



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

CAMPUS OF INTERNATIONAL EXCELLENCE

**MÁSTER EN GEOTECNOLOGÍAS CARTOGRÁFICAS EN
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

Escuela Politécnica Superior de Ávila

Proyecto Fin de Máster
2015 / 2016

**CARACTERIZACIÓN EN SIG DE LA SUBCUENCA
DEL RÍO ADAJA COMO APOYO EN PROCESOS DE
PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA**

Presentado por:

RAY LESMAR

Tutores:

Inmaculada Picón
Ángel Luis Muñoz

Fotografía: Ray Lesmar

Junio de 2016



*Todos los ríos
son el mismo mar.*

Fernando Soto Aparicio



Ray Lesmar, *“Caracterización en SIG de la subcuenca del Río Adaja como apoyo en procesos de Planificación Hidrológica” - Proyecto Fin de Máster 2015/2016*

a Bambi, Nala, Bella y Bobby

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos sinceros a la Universidad de Salamanca y al Banco Santander por darme la oportunidad de deleitarme con el arte de las geotecnologías desde una perspectiva española. Promover iniciativas de movilización internacional hacia claustros europeos de talentos latinoamericanos procedentes de países en vía de desarrollo es una evidencia palpable de cooperación internacional para el desarrollo económico y social, y la manera más inteligente de hacer más amable y mejor el mundo actual.

Agradecimientos inmensos a todo el exquisito y selecto *buffet* de docentes de la Universidad de Salamanca, y en especial a los de la Escuela Politécnica Superior de Ávila por todo el aporte, directo e indirecto, en cuanto al mensaje claro que han transmitido por medio del conocimiento en el campo de las geotecnologías, como alternativa, casi única, e imprescindible en el logro de un mundo desarrollado con enfoque sostenible.

Al Máster en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura, mil gracias por ofrecer la oportunidad de sumarme a sus excelentes propósitos profesionales y académicos. Gracias sinceras al director del Máster por su ejemplo y calidad humana.

La autoridad geográfica de España fue creada en el año 1870, experiencia importante como para adoptar a España como el padre geográfico de Colombia. Actualmente Colombia tiene excelentes prototipos de desarrollo geográfico, y se encuentra buscando el punto de articulación clave para potencializar y lograr una realidad geográfica soberana y abierta, que solventemente puede encontrarse en una Infraestructura de Datos Espaciales sólida que, articule, integre y facilite el uso responsable de la Información Geográfica en beneficio de todos. Colombia está luchando actualmente en conseguir ese objetivo. Hoy día cuenta con muy buenos productos técnicamente derivados, aun así, suele ser difícil tener acceso a los mismos porque son costosos o bien porque la cultura geográfica todavía es bastante celosa con ellos. En un tiempo no muy lejano, el país debe lograr articular a todos los productores cartográficos, ofreciendo oportunidades para todos, y costeando todo su potencial con los dineros provenientes de los contribuyentes.

España y Europa es un ejemplo claro y palpable para Colombia y para muchos países que actualmente luchan por ser cada vez mejores. Una lucha actual en contra de ciertos flagelos sociales, políticos y económicos que aquejan, de los que existe clara convicción de que, pronto, van a desaparecer y se transformarán en oportunidades para una mejor vida en este pequeñísimo viaje sobre la tierra.

Es un deber particular pensar en Colombia y compartir este mensaje para con nuestro contexto en vía de desarrollo. Más allá de los objetivos específicos del presente proyecto, es lograr adoptar una nueva manera de pensar y difundir el conocimiento adquirido.

ÍNDICE GENERAL

1. RESUMEN.....	13
2. INTRODUCCIÓN.....	14
3. OBJETIVOS.....	16
3.1. General.....	16
3.2. Específicos.....	16
4. ESTADO DEL ARTE.....	17
4.1. La Planificación Hidrológica.....	17
4.2. La Planificación Hidrológica en la Cuenca del Duero.....	18
4.3. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	20
4.4. El Desarrollo Sostenible.....	23
4.5. Normatividad en la planificación hidrológica.....	28
5. CONTEXTO GENERAL.....	32
5.1. Contexto general de la zona de estudio.....	32
5.2. Delimitación Cartográfica Actual. Recursos disponibles.....	34
5.3. Cuencas de España (Demarcaciones Hidrográficas).....	37
5.4. Características Generales de la Cuenca del Duero.....	38
5.5. Características Generales de la Subcuenca del río Adaja.....	45
6. SOFTWARE, DATOS Y FUENTES DE INFORMACIÓN.....	47
6.1. Software.....	47
6.2. Datos, estructuración y modelos.....	48
6.3. Fuentes principales de información.....	52
6.3.1. Instituto Geográfico Nacional. Centro de descargas del CNIG.....	53
6.3.2. Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León (IDECyL).....	53
6.3.3. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.....	54
6.3.4. Sistema Integrado de Información del Agua (SIA). Descargas.....	54
6.3.5. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).....	55
6.3.6. Confederación Hidrográfica del Duero (CHD).....	55
6.4. Fuentes ráster base.....	56
6.4.1. Modelo Digital de Terreno. Modelo Digital de Elevación.....	56
6.4.2. Ortofotografía Aérea del PNOA.....	59
6.4.3. Mapa Topográfico Nacional.....	62
6.4.4. Cartografía Geológica de España: IGME – CHD.....	63
6.4.5. Cartografía Climática de España: CHD – MAGRAMA – AEMET.....	64
6.5. Fuentes vectoriales base.....	65

6.5.1. Mapa Topográfico de Castilla y León (Fuente: IDECyL).....	66
6.5.2. Ocupación del Suelo en Castilla y León (Fuente: IDECyL).....	67
7. METODOLOGÍA.....	68
7.1. Delimitación de la zona de estudio.....	70
7.1.1. Unificación de los ficheros ráster.....	71
7.1.2. Cálculo de estadísticas.....	72
7.1.3. Creación de pirámides.....	73
7.1.4. Construcción del fichero de dirección de flujo preliminar.....	74
7.1.5. Corrección y ajuste de los ficheros de dirección de flujo.....	75
7.1.6. Construcción del fichero de dirección de flujo final.....	77
7.1.7. Construcción del fichero de acumulación de flujo.....	79
7.1.8. Identificación del punto de confluencia.....	81
7.1.9. Delimitación de la subcuenca.....	82
7.1.10. Comparación de resultados y elección del límite final.....	84
7.2. Generación de productos ráster derivados del MDE.....	85
7.2.1. Cálculo de la altura media de la subcuenca.....	85
7.2.2. Generación del modelo TIN.....	86
7.2.3. Generación del mapa de pendientes.....	86
7.2.4. Generación del mapa de orientaciones.....	88
7.2.5. Generación del mapa de sombreado.....	89
7.2.6. Extracción de redes de drenaje y determinación de jerarquía.....	90
7.3. Productos finales y selección de las capas temáticas.....	93
7.3.1. Temáticas.....	95
7.3.2. Lista de mapas.....	96
7.4. Rangos de escala y sistemas de referencia.....	97
7.4.1. La escala de trabajo.....	97
7.4.2. El sistema de referencia utilizado.....	98
7.5. Definición de la estructura de la BDG y el modelo de datos.....	99
7.6. Definición de las propiedades espaciales de los datos.....	102
7.7. Diseño y gestión de la base de datos geográfica.....	103
8. RESULTADOS.....	114
8.1. Delimitación de la zona de estudio.....	115
8.2. Orografía.....	117
8.2.1. Elevaciones.....	117
8.2.2. Pendientes.....	119
8.2.3. Orientaciones.....	120

8.2.4. Sombreado.....	121
8.3. Cuencas vertientes.....	122
8.4. Dirección y acumulación de flujo.....	122
8.4.1. Red de drenaje y jerarquía.....	123
8.4.1.1. Extracción automática de la red de drenaje.....	124
8.5. Jerarquía del drenaje.....	125
8.6. Hidrografía.....	126
8.7. Infraestructura vial.....	127
8.8. Ocupación del suelo.....	128
8.9. Aspectos geológicos y edafológicos.....	130
8.10. Aspectos climáticos.....	132
8.11. Lista de mapas.....	137
8.11.1. Cartografía base.....	137
8.11.2. Cartografía geológica y edafológica.....	137
8.11.3. Cartografía climática.....	137
8.11.4. Cartografía orográfica y jerarquía del drenaje.....	137
8.12. Diseño de plantillas y salidas gráficas.....	138
8.12.1. Cuadrícula de salida final de mapas análogos.....	138
8.12.2. Modelo de plantilla y salida final gráfica.....	139
9. CONCLUSIONES.....	140
10.DESARROLLOS FUTUROS.....	142
11.BIBLIOGRAFÍA.....	144
11.1. Referentes impresos consultados.....	144
11.2. Referentes digitales consultados.....	146
11.3. Páginas Web consultadas.....	148
12.ANEXOS.....	151
12.1. ANEXO I: Base de Datos Geográfica en formato (.gdb).....	151
12.2. ANEXO II: Ficheros ráster.....	151
12.3. ANEXO III: Mapas en formato PDF o JPEG para impresión.....	151
12.4. ANEXO IV: Leyendas geológicas MAGNA 50 del IGME.....	151

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Partes de un SIG.
- Figura 2.** ITAIPU BINACIONAL Hidroeléctrica (Brasil – Paraguay).
- Figura 3.** SIG, Planificación y Desarrollo Sostenible.
- Figura 4.** Cartografía y SIG: soporte principal en el desarrollo sostenible.
- Figura 5.** Demanda de agua en m³/habitante/año.
- Figura 6.** Demanda, consumo y retorno de agua (hm³) / año.
- Figura 7.** Reserva total de agua embalsada en España.
- Figura 8.** Cuenca Hidrográfica del Duero.
- Figura 9.** Subcuencas de los cauces de la red hidrográfica básica.
- Figura 10.** Subcuencas hidrográficas asociadas al cauce del Río Adaja.
- Figura 11.** Demarcación hidrográfica establecida en el RDL 125/2007.
- Figura 12.** Principales ríos de España.
- Figura 13.** Ámbito territorial internacional de la Cuenca del Duero.
- Figura 14.** Cuenca del Duero.
- Figura 15.** Localización de la cuenca del Duero y Comunidades Autónomas.
- Figura 16.** Porcentaje de territorio que ocupa la cuenca del Duero.
- Figura 17.** Red fluvial principal de la cuenca del Duero. Fuente: CHD.
- Figura 18.** Series de vegetación de la cuenca del Duero. Fuente: CHD.
- Figura 19.** Principales embalses de la cuenca del Duero. Fuente: CHD.
- Figura 20.** Relieve de la cuenca del Duero. Fuente: CHD.
- Figura 21.** Aspectos Geológicos de la cuenca del Duero. Fuente: CHD.
- Figura 22.** Geología de la cuenca del Duero. Fuente: CHD.
- Figura 23.** Leyenda Geológica de la cuenca del Duero. Fuente: CHD.
- Figura 24.** Zonificación hidrológica de la cuenca del Duero. Fuente: CHD.
- Figura 25.** Reserva total embalsada de la cuenca del Duero.
- Figura 26.** Características hidrológicas de la subcuenca del Río Adaja.
- Figura 27.** ArcGIS 10.3.
- Figura 28.** Primitivas geométricas en el modelo de representación vectorial.
- Figura 29.** Modelos de datos geográficos.
- Figura 30.** Dimensión de los datos geográficos.
- Figura 31.** Concepto de capa de información geográfica dentro de un SIG.
- Figura 32.** Portal Web del Centro de Descargas del IGN.
- Figura 33.** Portal Web del Centro de descargas de la IDE de Castilla y León.
- Figura 34.** Portal Web Cartografía y SIG del MAGRAMA.
- Figura 35.** Portal Web de descargas de información geográfica del SIA.
- Figura 36.** Portal Web de descargas de información geográfica del IGME.
- Figura 37.** Portal Web de la Confederación Hidrográfica del Duero.
- Figura 38.** Portales Web de las principales fuentes de información geográfica.
- Figura 39.** Catálogo de productos MDT del CNIG.
- Figura 40.** Cuadrícula del MTN50 con cubrimiento de la zona de estudio.
- Figura 41.** Modelo Digital de Elevaciones MDT05.
- Figura 42.** Catálogo de productos PNOA del CNIG.
- Figura 43.** Actualización PNOA. Fuente PNOA (2016).
- Figura 44.** Ortofotografía PNOA.
- Figura 45.** Catálogo del MTN25 ráster del CNIG.
- Figura 46.** Mapa Topográfico Nacional Ráster escala 1:25.000.
- Figura 47.** Cartografía Geológica ráster del IGME.
- Figura 48.** Cartografía Geológica.

- Figura 49. Cartografía Climática.
- Figura 50. Cartografía vectorial base.
- Figura 51. Cartografía Base vectorial escala 1:10.000.
- Figura 52. Ocupación del Suelo SIOSE - CORINE.
- Figura 53. Cartografía de Ocupación del Suelo escala 1:25.000.
- Figura 54. Esquema metodológico.
- Figura 55. MDT de 5, 25 y 200 metros de resolución espacial.
- Figura 56. Unificación de ficheros ráster de MDT 200.
- Figura 57. Unificación de ficheros ráster de MDT 25.
- Figura 58. Unificación de ficheros ráster de MDT 05.
- Figura 59. Cálculo de estadísticas.
- Figura 60. Construcción de pirámides.
- Figura 61. Fundamentos teóricos del fichero de la dirección de flujo.
- Figura 62. Fichero preliminar de la dirección de flujo.
- Figura 63. Herramienta para la detección de sumideros.
- Figura 64. Corrección del MDE mediante el relleno de los sumideros.
- Figura 65. Herramienta para eliminación de sumideros.
- Figura 66. Interpretación del Mapa de dirección de flujo.
- Figura 67. Fundamentos teóricos del mapa de dirección de flujo.
- Figura 68. Ficheros de la dirección de flujo corregidos.
- Figura 69. Herramienta para el cálculo del fichero de acumulación de flujo.
- Figura 70. Acumulación de flujo.
- Figura 71. Fundamentos teóricos del mapa de acumulación de flujo.
- Figura 72. Acumulación de flujo de la subcuenca del río Adaja.
- Figura 73. Localización geográfica del punto de confluencia.
- Figura 74. Localización geográfica del punto de confluencia sobre vista PNOA.
- Figura 75. Metodologías para la delimitación de cuencas hidrográficas.
- Figura 76. Fundamentos teóricos para el cálculo de la cuenca de drenaje.
- Figura 77. Herramienta para la delimitación de la cuenca de drenaje.
- Figura 78. Correspondencia de la cuadrícula del MTN50.
- Figura 79. Comparación de los resultados de la delimitación de la subcuenca.
- Figura 80. Fundamentos teóricos para el cálculo de la altura media.
- Figura 81. Fundamentos teóricos del modelo TIN.
- Figura 82. Fundamentos teóricos del mapa de pendientes.
- Figura 83. Fundamentos teóricos para el cálculo del mapa de pendientes.
- Figura 84. Fundamentos teóricos de los ángulos de pendiente y la orientación.
- Figura 85. Fundamentos teóricos para el cálculo del mapa de orientaciones.
- Figura 86. Fundamentos teóricos para el cálculo del mapa de sombreado.
- Figura 87. Definición de la red de drenaje.
- Figura 88. Análisis de la morfometría fluvial (jerarquía de cauces).
- Figura 89. Esquema teórico de la jerarquía de drenaje
- Figura 90. Fundamentos teóricos de las temáticas de una BDG.
- Figura 91. Temáticas seleccionadas para la caracterización física.
- Figura 92. Sistemas de referencia asociados a la cartografía del proyecto.
- Figura 93. Zonas del sistema de referencia UTM ETRS 1989.
- Figura 94. Estructura de la BDG del proyecto.
- Figura 95. Fundamentos teóricos del Modelo Entidad - Relación.
- Figura 96. Patrones de diseño de una BDG.
- Figura 97. Reglas topológicas.
- Figura 98. Diseño preliminar de la BDG del proyecto.

- Figura 99.** *Componente espacial y alfanumérica de la capa "aforo".*
- Figura 100.** *Componente espacial y alfanumérica de la capa "curvas de nivel".*
- Figura 101.** *Componentes de la capa "delimitación de la subcuenca".*
- Figura 102.** *Componentes de las capas "división política administrativa*
- Figura 103.** *Componente espacial y alfanumérica de las capas "hidrografía".*
- Figura 104.** *Vista gráfica de la hidrografía de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 105.** *Componentes de la capa "ocupación del suelo".*
- Figura 106.** *Vista gráfica de la ocupación del suelo de la subcuenca.*
- Figura 107.** *Vista gráfica de edificaciones y construcciones de la subcuenca.*
- Figura 108.** *Vista gráfica de puntos de referencia de la subcuenca.*
- Figura 109.** *Vista gráfica de servicios e instalaciones de la subcuenca.*
- Figura 110.** *Componentes de las capas "red de transporte".*
- Figura 111.** *Vista gráfica de la red de transporte de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 112.** *Resumen de resultados.*
- Figura 113.** *Delimitación de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 114.** *Localización geográfica de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 115.** *Participación de superficie de la subcuenca en las provincias.*
- Figura 116.** *Elevaciones de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 117.** *Modelo TIN de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 118.** *Elevaciones y cálculo de áreas por rangos.*
- Figura 119.** *Pendientes de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 120.** *Pendientes y cálculo de áreas por rangos.*
- Figura 121.** *Orientaciones de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 122.** *Sombreado de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 123.** *Sombreado y cálculo de áreas por rangos.*
- Figura 124.** *Cuencas vertientes asociadas la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 125.** *Dirección de flujo de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 126.** *Criterios para la extracción automática de la red de drenaje.*
- Figura 127.** *Jerarquía del drenaje de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 128.** *Hidrografía básica de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 129.** *Hidrografía detallada de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 130.** *Red principal de transporte de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 131.** *Ocupación del suelo de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 132.** *Descripción de coberturas de la ocupación del suelo.*
- Figura 133.** *Áreas y porcentajes de participación de la ocupación del suelo.*
- Figura 134.** *Geología MAGNA 50 de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 135.** *Leyendas de la geología MAGNA 50 de la subcuenca.*
- Figura 136.** *Aspectos geológicos de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 137.** *Aspectos edafológicos de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 138.** *Precipitación total anual (mm) de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 139.** *Temperatura media anual (°C) de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 140.** *Evapotranspiración potencial anual (mm) de la subcuenca.*
- Figura 141.** *Evapotranspiración real anual (mm) de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 142.** *Escorrentía subterránea anual (mm) de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 143.** *Recarga de acuíferos anual (mm) de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 144.** *Escorrentía total anual (mm) de la subcuenca del río Adaja.*
- Figura 145.** *Aportación media anual en régimen natural de la subcuenca.*
- Figura 146.** *Cuadrícula de salida final gráfica de mapas análogos.*
- Figura 147.** *Modelo de plantilla y salida final gráfica de mapas.*

LISTA DE ACRÓNIMOS

AEMET: *Agencia Estatal de Meteorología*

BD: *Base de Datos*

BDE: *Base de Datos Espacial*

BOE: *Boletín Oficial del Estado*

BDG: *Base de Datos Geográfica*

CAD: *Computer – aided design*

CEDEX: *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas*

CHD: *Confederación Hidrográfica del Duero*

CSW: *Servicio de Catálogo para la Web*

DGA: *Dirección General del Agua*

DIVIPOLA: *División Político Administrativa*

DMA: *Directiva Marco Europea del Agua*

ED50: *European Datum 1950*

EMC: *Evaluación Multi-Criterio*

EPSG: *European Petroleum Survey Group*

ESRI: *Environmental Systems Research Institute*

ETRS89: *European Terrestrial Reference System 1989*

FAO: *Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*

FEGAMP: *Federación Galega de Municipios e Provincias*

GRS80: *Geodetic Reference System 1980*

ICA: *Asociación Internacional de Cartografía*

IDE: *Infraestructura de Datos Espaciales*

IDECyL: *Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León*

IDEE: *Infraestructura de Datos Espaciales de España*

IG: *Información Geográfica*

IGME: *Instituto Geológico y Minero de España*

IGN: *Instituto Geográfico Nacional*

ITRS: *International Terrestrial Reference System*

LiDAR: *Laser Imaging Detection and Ranging*

MAGRAMA: *Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente*

MDE: *Modelo Digital de Elevación*

MDOO: *Modelo de Datos Orientado a Objetos*

MDT: *Modelo Digital de Terreno*

MMA: *Ministerio de Medio Ambiente*

MOPT: *Ministerio de Obras Públicas y Transporte*

ONU: *Organización de las Naciones Unidas*

PNOA: *Plan Nacional de Ortofotografía Aérea*

RSU: *Residuos Sólidos Urbanos*

SIA: *Sistema Integrado de Información del Agua*

SIG: *Sistema de Información Geográfica*

SGBD: *Sistema Gestor de la Base de Datos*

SIMPA: *Sistema Integrado de Modelización Precipitación y Aportación*

SLD: *Servicio Descriptor de Estilos de Capa*

TIN: *Triangulated Irregular Network*

UTM: *Universal Transversa de Mercator*

WCS: *Servicio Web de Coberturas*

WMS: *Servicio de Mapas Web*

WFS: *Servicio Web de Fenómenos, entidades u objetos*

WFS-G: *Servicio de Nomenclátor*

1. RESUMEN

Se pretende realizar una caracterización física de los principales aspectos superficiales de la subcuenca topográfica del río Adaja, relacionados con la localización geográfica, orografía, hidrografía, infraestructura vial, ocupación del suelo, aspectos geológicos, edafológicos y climáticos. Dichas temáticas han sido seleccionadas y catalogadas como principales según algunos referentes literarios consultados orientados al tema de la Planificación hidrológica.

La caracterización de la subcuenca desde dichas perspectivas, se aborda desde los Sistemas de Información Geográfica (SIG), significando ello que la documentación acerca del marco físico se adapta a un entorno especial y se extrae como información geográfica en formato vectorial y ráster, consultada y obtenida de fuentes cartográficas oficiales españolas dispuestas de manera "gratuita" en la Web, en distintas escalas y presentaciones.

Como objetivos principales, se estructura la información recopilada en una Base de Datos Geográfica (BDG), donde dicha información reposa, en un nivel básico, a manera de repositorio organizado que puede ser útil en la aplicación de geoprocursos que conducen a la generación de productos cartográficos derivados del análisis espacial, enmarcados dentro del contexto de los desarrollos futuros.

Al final, se comentan algunas aplicaciones o desarrollos futuros, desde SIG hasta derivaciones de información hidrológica, e incluso hidráulica, que explican para qué puede ser útil el resultado de este proyecto y por qué es importante, respecto a toda la información geográfica disponible en la Web que se encuentra "suelta" y, en muchos casos, susceptible a una posterior adecuación topológica y edición para favorecer la calidad en los resultados de aplicaciones futuras.

Otro aspecto que motiva, es que el producto aquí desarrollado puede incentivar a las autoridades competentes al desarrollo de Planes Hidrológicos a mayor escala, partiendo del principio de que una ampliación de lo que ocurre en la superficie terrestre, siempre mostrará cosas que, a escalas más pequeñas, no se perciben tan fácilmente.

Los objetivos se alcanzan, junto con los productos finales, aplicando una serie de procedimientos técnicos de manera sistemática: se empieza por la delimitación de la zona de estudio, la identificación de los productos finales y la selección de las capas de información geográfica a incorporar en la BDG; posteriormente, se procede a especificar los rangos de escala y los sistemas de referencia geográficos y proyectados, definición de la estructura de la BDG y la descripción del modelo de datos y, finalmente, se organizan los resultados en dos partes: la primera a manera de informe y documentación de las características físicas superficiales principales y, luego, organizados en mapas como salidas gráficas finales con propósitos de impresión física, utilizando plantillas sencillas diseñadas y ajustadas al área total de la subcuenca.

2. INTRODUCCIÓN

El agua es la base principal que sostiene la vida. Ella es tan buena como mala puede llegar a ser si se provoca su furia. Tan simple como esto, lo mejor es cuidarla porque, en presencia de los hombres, ella es incapaz de hacerlo por sus propios medios. En el planeta existe gran cantidad de agua, infortunada o afortunadamente, ésta solo puede ser aprovechada, de manera casi inmediata y directa, en una mínima proporción, por lo que *"los recursos hídricos más importantes para el hombre se reducen a las aguas interiores que representan menos de un 2% del volumen total del agua presente en el planeta"*. (Ministerio de Medio Ambiente, 1997)

La mejor manera de ayudarle es partiendo del principio de organizar y planificar acciones que involucren, en síntesis, el uso, el consumo, la demanda y el retorno de la misma a un sitio específico. Según el MMA (1997) *"el uso del agua es el volumen bruto que se suministra; Por demanda se entienden los caudales y volúmenes de agua que se precisan para cada actividad; consumo significa la pérdida o reducción física del agua disponible; Retorno es el volumen de agua utilizado y no consumido que se incorpora de nuevo al caudal de los ríos"*.

La escala de focalización y/o priorización en la revisión de actuaciones podría ampliarse mediante la formulación de Planes Hidrológicos a nivel de detalle de subcuenca, por lo que, uno de los objetivos principales del presente proyecto es promover esta iniciativa que permita vigilar (con el apoyo de la información geográfica y/o espacial, la cartografía, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), y los mapas), con mayor detalle y detenimiento lo que sucede al interior de subcuencas como la del río Adaja en materia de aguas. Entorno SIG basado en una Base de Datos Geográfica (BDG), estática, estructurada bajo el modelo de datos lógico relacional, implementado en un Gestor de Base de Datos de escritorio independiente, con posibilidades de incorporar extensiones funcionales para aplicaciones hidrológicas futuras, y migración de geodatos a la Web como servicios de mapa, etc.

Actualmente las actuaciones de planificación pueden ser bastante eficientes y eficaces, así como ejemplares, no obstante, siempre hay algo que mejorar, que revisar, que seguir sigilosamente, tareas que valen la pena abordar en beneficio del desarrollo sostenible del agua.

El presente trabajo no pretende escribir las formulaciones de las políticas y normas a seguir sobre las actuaciones en la subcuenca del río Adaja, pero si proveer un entorno en formato SIG detallado y sencillo, unificado, consolidado, estructurado (en niveles básicos), a mayor escala, de las características principales superficiales de la subcuenca, así como aportar una buena revisión literaria. Para ello se realiza una selección de información geográfica en formatos vectoriales y ráster, sobre los cuales se aplican procesos básicos como cortes, uniones y conversión de cartografía vectorial a un formato de Base de Datos Geográfica (.gdb) organizados en datasets de entidades.

El tratamiento de la cartografía ráster aquí implementado, tomando como referencia principal el Modelo Digital de Elevaciones (MDT), es más amplio que el tratamiento de la cartografía vectorial recopilada, focalizando procesos para la derivación de productos ráster tales como pendientes, orientaciones, mapa de flujo, etc., además que se toma como insumo para validar la delimitación de la subcuenca topográfica de drenaje asociada al cauce del río Adaja, desde su nacimiento hasta su desembocadura.

El tratamiento de la cartografía vectorial se limita a cortar y seleccionar los geodatos de interés para la zona de estudio, constituyendo procesos avanzados de estructuración, topología y edición como tareas para desarrollos futuros.

A partir de ellos, proveer una base de datos geográfica organizada y oportuna para ser utilizada, por quien corresponda, en el desarrollo de productos cartográficos derivados, mediante la implementación de SIG, que ayuden a ampliar el conocimiento de ciertos fenómenos que influyen, directa e indirectamente, en el desarrollo sostenible del agua. De acuerdo con Moreno et al. (2007) *“con la información bien organizada en la base de datos espaciales el SIG nos faculta para desarrollar un rico abanico de tratamientos y análisis”*.

El presente trabajo se ha desarrollado a partir de 12 capítulos correspondientes a: un “Resumen” que destaca los principales procedimientos desarrollados; “Introducción” con apuntes relevantes en torno al enfoque cartográfico como gestor y soporte de la planificación hidrológica, y apuntes importantes a tener presente en cuanto al alcance del proyecto; “Objetivos” general y específicos; un capítulo de “Estado del Arte” donde se aborda aspectos y fundamentos teóricos relevantes relacionados con la planificación hidrológica, los SIG, el desarrollo sostenible y la normatividad que regula la actividad del agua en España; continúa un “Contexto General” que describe las principales características del área de interés; una breve descripción acerca de “Software, Datos y Fuentes de Información”.

Seguidamente, se aborda la “Metodología” que destaca los principales procedimientos técnicos para la consecución de los productos finales; “Resultados” donde se organizan las caracterizaciones físicas superficiales de la subcuenca con base a información de tipo ráster y sus derivados, así como lo relacionado con la información vectorial; “Conclusiones”; “Desarrollos Futuros” donde se menciona algunas aplicaciones para los cuales este producto puede ser útil, así como los desarrollos que deben continuar adaptándose relacionados con la estructuración, la edición y la topología de la BDG; finalmente, se menciona la “Bibliografía” consultada y los “Anexos” asociados correspondientes.

3. OBJETIVOS

3.1. General

Desarrollo de un Sistema de Información Geográfica (SIG) que facilite la caracterización física superficial de la subcuenca asociada al cauce principal de la red hidrográfica básica del río Adaja, localizada en la cuenca del Duero, Comunidad Autónoma de Castilla y León, España, como apoyo en la futura formulación de Planes Hidrológicos con fines de planificación y ordenación del territorio.

3.2. Específicos

- Consolidar y estructurar una base de datos geográfica en formato SIG, mediante la integración y el tratamiento de cartografía oficial española proveniente de diversas fuentes.
- Configurar y proveer las bases cartográficas en un entorno SIG que permita el análisis espacial mediante el geoprocesamiento, como apoyo en la formulación de futuras normas y/o políticas de uso sostenible del agua, enmarcado dentro de la formulación de Planes Hidrológicos.
- Reconocer y documentar el entorno hidrológico básico de la subcuenca asociada al cauce principal del río Adaja con miras a establecer relaciones entre elementos geográficos y espaciales de tipo ambiental, físico, paisajístico, social, etc., que interactúan e influyen directa e indirectamente sobre el uso sostenible el agua.

4. ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo hace referencia al contexto general de los propósitos y objetivos principales de la Planificación Hidrológica; al contexto local correspondiente a la Cuenca Hidrográfica del Duero; a un recorrido conceptual desde los inicios de los SIG hasta el día de hoy; a un enfoque de Sostenibilidad relacionado con la información geográfica y la planificación hidrológica; y por último un resumen de los principales acontecimientos normativos que regulan esta disciplina en España.

4.1. La Planificación Hidrológica

El agua no se agota, es la que es y la que hay, lo que se daña es su calidad, así como la alteración de su viaje natural sobre la superficie de la tierra. Es un elemento tanpreciado y vital para todos que merece especial importancia, y *"constituye un elemento imprescindible para el desarrollo vital en todos los ecosistemas"*. (MMA, 1997)

La planificación hidrológica es el arte que define acciones claras en cuanto al uso, la demanda, el consumo y el retorno del agua, imponerlas, cumplirlas y hacerlas cumplir a todos los seres humanos que habitan una región específica y se abastecen directa e indirectamente de los recursos hídricos disponibles en ella, por lo que prioriza *"la adopción de un conjunto de estrategias, actividades y sistemas organizativos, referidas a un periodo futuro, dirigidas a alcanzar unos fines prefijados"* (Sánchez, 1993), mientras el MMA (1997) afirma que *"la ordenación de aguas es una disciplina que se encarga de solucionar los problemas relacionados con la utilización del agua, desde la búsqueda de fuentes disponibles hasta su suministro, según la demanda, para las diversas actividades humana"*.

Uno de los propósitos principales de la planificación hidrológica es ordenar el agua: disponerla de tal manera que garantice el abastecimiento sin acarrear mayores costes en el largo plazo, por lo que *"la ordenación del agua se encarga de acercar los recursos a las necesidades de los seres vivos, y su actuación se traduce en la regulación de los cursos de los ríos, la construcción de embalses, presas, etc."* (MMA, 1997). Es, por tanto, la ordenación del agua uno de los propósitos del ordenamiento territorial porque su disposición, adecuación, manejo y gestión, implican la interacción directa con elementos que conviven en un mismo entorno físico y social, que también deben ser dispuestos sobre la superficie de tal manera que se articulen y armonicen con todos los elementos necesarios para poner el agua en el mejor sitio posible.

Sánchez (1993) afirma que *"los grandes fines de la planificación hidrológica son: asegurar la satisfacción de las necesidades básicas para la vida; garantizar la seguridad de las personas y de las propiedades"*. En este orden de ideas, la planificación hidrológica debe promover como ejemplo socio-político el desarrollo sostenible del agua: satisfacer las necesidades actuales, asegurar las necesidades futuras, establecer un equilibrio ambiental, social y económico.

El Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) (2016) afirma que *“los objetivos generales de la planificación hidrológica se centran en conseguir el buen estado y la adecuada protección del dominio público hidráulico y de las aguas, la satisfacción de las demandas de agua, el equilibrio y armonización del desarrollo regional y sectorial”*. En sus inicios como entidad oficial española reguladora de asuntos medioambientales el MMA (1997), afirmaba que *“la planificación hidrológica pone el énfasis en el desarrollo de los recursos hídricos a través de la construcción de presas y embalses, la repoblación forestal de las cuencas fluviales, la conservación de la humedad del suelo y la perforación de pozos de exploración para aprovechar las aguas subterráneas”*.

Los seres humanos deben adaptar a su entorno las distintas maneras de abastecimiento de agua. En el transcurso de estas adaptaciones se producen alteraciones del ciclo natural del agua produciendo consecuencias que deben ser tratadas y mitigadas utilizando instrumentos de planificación y ordenación, como lo son los planes hidrológicos en su unidad principal de actuación que es la cuenca, y en su unidad más detallada que es la subcuenca.

Por esta y muchas otras razones, es importante cada vez más amplificar la importancia de este valioso recurso intensificando las acciones de protección, acciones que van a ser más y mejor detalladas (focalizadas con mayor resolución) si se piensa en una planificación más integral y focalizada mediante la formulación de los planes hidrológicos a nivel de subcuenca, en total articulación y coordinación con los planes hidrográficos a nivel de cuenca y en concordancia con el Plan Hidrológico Nacional como órgano rector.

4.2. La Planificación Hidrológica en la Cuenca del Duero

Corresponde a la Confederación Hidrográfica del Duero todo lo relacionado con la cuenca hidrográfica del río Adaja. Actualmente, ésta dependencia del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España (MAGRAMA) es el delegado responsable de formular, administrar y ejecutar todo lo relacionado con el Plan Hidrológico, quien lo tiene establecido para implementar en el periodo comprendido entre los años 2015 y 2021, previa validación legislativa del Real Decreto 1/2016, de 8 de enero, así como el responsable de gestionar toda la información geográfica relevante en la formulación de políticas y acciones legales claras en busca de la conservación y desarrollo sostenible del agua que entra, fluye y sale de la cuenca del Duero.

Dicho plan, actualmente contiene:

- Referentes normativos y legislativos (Anexo IV del Real Decreto 1/2016, de 8 de enero).
- Memoria del Plan Hidrológico del Duero, de diciembre de 2015, que contiene 486 folios con todo lo referente a la planificación y ordenación de la cuenca (costes, recursos, demandas, usos, demarcación, presiones, masas de agua, buen estado, etc.).

- Documentos anexos específicos relacionados con: Masas de agua artificiales y muy modificadas; Inventario de recursos hídricos; Zonas protegidas; Caudales ecológicos; Demandas de agua; Asignación y reserva de recursos; Inventario de presiones; Programa de control de las masas de agua; Valoración del estado de las masas de agua; Objetivos ambientales; Recuperación de costes; Participación pública; Manual del sistema de información; Programa de medidas; Plan especial de sequías; Patrimonio hidráulico; Estudio ambiental estratégico; otros documentos.

Junto a ello un anexo directamente relacionado con los alcances del presente proyecto correspondiente con un rico Atlas de mapas (Anexo 14), que incluye 178 mapas con exquisitos y nutridos contenidos de caracterizaciones físicas de la cuenca hidrográfica del Duero. No obstante, lo anterior, la especificidad de información cartográfica, la integración de diversas fuentes oficiales con cartografía de mayor escala, y procesos característicos particulares extraídos de insumos ráster de mayor resolución espacial, como el MDE de 5x5 metros, no se perciben de manera directa y explícita como lo enseña el presente ejemplar.

No se evidencia una cartografía integrada y consolidada, con mayor detalle, acerca de las características específicas de la subcuenca del río Adaja, por lo que el presente trabajo aporta una iniciativa particular para invitar a las administraciones competentes a “hacer un zoom” acerca de las posibles formulaciones de Planes Hidrográficos asociados a las subcuencas del Duero, como la subcuenca del Adaja, y otras de importante interés asociadas a cauces de ríos que merecen toda la atención y tratamiento para maximizar las actuaciones en materia de desarrollo sostenible del agua.

Siempre será conveniente insistir en prestar cada vez más el mayor interés posible y potencial acerca de la vigilancia del agua. Atendiendo a lo anterior, el presente proyecto provee una iniciativa de caracterización integral básica, para dar inicio a múltiples aplicaciones que involucren directamente el análisis espacial y el geoprocésamiento para generar productos derivados de interés fundamental en la materia, los cuales se mencionarán a manera de desarrollos futuros en un apartado posterior.

4.3. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

La importancia del agua, puede y merece especial atención y tratamiento haciendo uso de la Información Geográfica (IG) como recurso tecnológico principal que mueve los SIG y, que facilita la caracterización de fenómenos ambientales, sociales, físicos, hidrológicos, etc., así como una mayor comprensión de los mismos. La particularidad y valor agregado de la información que añade una referencia espacial *"tiende a reducir nuestra incertidumbre sobre el mundo que nos rodea"*. (Bernabé & López, 2012)

Moreno et al. (2007) afirma que *"estamos en las puertas de una etapa nueva de la civilización calificable de sociedad de la información geográfica"*, en el que el combustible de los SIG es la IG, y la gestión de la misma es posible utilizando SIG como motor de la misma. En sus distintas presentaciones, la IG, los mapas, la cartografía, en conjunto son más potentes en la medida que se encuentran organizados y estructurados para proveer soluciones y respuestas eficientes y oportunas, por lo que *"es una realidad que la cartografía se hace de manera progresiva más visible en nuestra sociedad y en determinados aspectos asume una parte de liderazgo en el mundo de la información geográfica"* (Konecny, 2007).

Un SIG no constituye solamente una colección de datos geográficos y/o espaciales, sino que involucra un baremo de procesos lógicos, consistentes y sistematizados, que interaccionan entre sí para producir un análisis geográfico que sea útil en la toma de decisiones. No obstante, el soporte principal de un SIG consiste en un repositorio cartográfico debidamente estructurado y lógico, organizado y listo para extraer y/o combinar niveles de información geográfica y/o espacial, por lo que *"... lo específico del SIG reside en rasgos tales como su capacidad de almacenar grandes masas de información geo-referenciada o su potencia para el análisis de la misma, que le hacen idóneo para abordar problemas de planificación y gestión, es decir, para la toma de decisiones"*. (Moreno et al., 2007). Por su parte Peña (2006) afirma que *"los S.I.G. son una nueva tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial, y que surgió como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato"*.

Hablar de un concepto universal de SIG como tal no tiene sentido. El sentido va apareciendo en la medida que se ajusta, adapta y resuelven problemas específicos utilizando diversos recursos. El SIG es una colección de componentes cuya esencia gira en torno a un modelo lógico de datos. Según Tomlinson (2007) *"se necesita una herramienta más flexible para explicarlo: un modelo"*.

Se escoge el modelo según se adapte mejor a unas necesidades particulares. Aquí, un modelo de datos relacional, y algunas particularidades del modelo de objetos orientado a datos relacionales, pueden satisfacer los objetivos propuestos. Una visión más ambiciosa sería adaptar un modelo orientado a objetos que, además de atributos, asigne comportamientos específicos a los objetos, sin embargo *"cada modelo posee ciertas características que pueden*

facilitar u obstaculizar esta estructura de administración de su base datos específica". (Tomlinson, 2007)

En particular, el esquema adoptado para la caracterización (en principio física), describe de manera clara y suficiente, las particularidades de la subcuenca del río Adaja, en la preparación de escenarios, en formato SIG, apropiados y oportunos en facilitar elementos clave para derivar y crear información secundaria y valiosa que nutren un adecuado análisis hidrológico, en vísperas de contribuir a una buena planificación hidrológica.



Figura 1. Partes de un SIG.

"La primera referencia al termino S.I.G. aparece por Tomlinson en 1967, referida a "una aplicación informática cuyo objetivo es desarrollar un conjunto de tareas con información geográfica digitalizada". Más tarde, Tomlinson (2007), considerado "padre de los SIG", conecta con la evolución del SIG en aportaciones literarias más desarrolladas, sobre las que aporta una visión más amplia referida a una evolución conceptual y metodológica a la hora de abordar un SIG, siendo más versátil en la medida que pone su potencial según las necesidades particulares y su potencial en función de la capacidad que tiene para satisfacer la resolución de cierto problema espacial, haciendo uso del análisis espacial, en la producción de información derivada útil en la toma de decisiones.

Ordoñez & Martínez (2003) por su parte afirma que *“la característica que distingue a los SIG de otros sistemas informáticos que trabajan con información espacial es su capacidad de realizar análisis conjuntos de datos espaciales y sus atributos”*. Una simple consulta por selección de atributos o por localización constituye una manera sencilla y básica de análisis espacial, como principio en la interacción con otras temáticas y fenómenos asociados al contexto hidrológico, por lo que de acuerdo con Olaya (2011) *“prácticamente todo cuanto hacemos con los datos espaciales constituye alguna forma de análisis”*.

En 1988 Burrough y McDonnell, amplían el concepto a *“un sistema de herramientas para reunir, introducir, almacenar, recuperar, transformar y cartografiar datos espaciales sobre el mundo real con el fin de satisfacer múltiples propósitos”*. 10 años más tarde Burrough & MacDonnell (1998), lo definen como *“un SIG es un conjunto de herramientas destinadas a la captura, almacenamiento, tratamiento, análisis, consulta y visualización de datos espaciales extraídos del mundo real para unos fines concreto”*. En 1990, el National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA) de USA los define como *“sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión”*. (Peña, 2006)

Moreno et al. (2007) refuta afirmando que *“conviene insistir en que un SIG no es meramente un programa de cartografía por ordenador, ni un software de tipo CAD (Computer – aided desing)”*, constituyendo esto una característica particular de los SIG en cuanto permite estructurar la información geográfica en capas independientes y por geometrías separadas, cosa que los softwares CAD no lo hacen porque mezclan geometrías.

Según Olaya (2011), *“un SIG ha de permitir la realización de las siguientes operaciones: Lectura, edición, almacenamiento y, en términos generales, gestión de datos espaciales; Análisis de dichos datos”*. En el 2016, el Instituto Geográfico Nacional (IGN) sostiene en su portal Web, que un SIG se considera un *“conjunto integrado de medios y métodos informáticos, capaz de recoger, verificar, almacenar, gestionar, actualizar, manipular, recuperar, transformar, analizar, mostrar y transferir datos espacialmente referidos a la Tierra”*.

Desde 1967 hasta el 2016, son innumerables las aseveraciones acerca de la concepción de SIG. No obstante, el concepto más inteligente se estima alrededor de la capacidad con la que se planifica, diseña e implementa el SIG, para satisfacer los objetivos y propósitos específicos de un proyecto comercial y/o académico.

El SIG es exitoso, o menos exitoso, en la medida que cumpla mejor los objetivos propuestos y/o las expectativas de un cliente, por lo que en ultimas, y de acuerdo con Peña (2006), resulta *“realmente complejo explicar el concepto de S.I.G y no hay un consenso a la hora de definir un S.I.G., debido a que integra dentro de un mismo concepto tanto los componentes como las funciones”*.

Un SIG puede ser bastante robusto, costoso, sólido, completo, llamativo y atractivo, sin embargo, puede no estar orientado a la resolución de los problemas principales.

De acuerdo con Tomlinson (2007) es importante planificar el SIG, y junto a todo el desarrollo de los componentes o subsistemas, debe considerarse que *“la tecnología cambia bajo nuestros pies como la crecida de una marea. Para cosechar los inmensos beneficios a largo plazo del SIG, se tiene que planificar con anticipación en tiempos de avances vertiginosos”*.

Esto sugiere planificar una línea de tiempo, y estimar la vida útil del SIG para que continúe actualizado y competentemente funcional. Ello implica, ajuste de formatos, capacitación del personal encargado de la gestión y mantenimiento de las bases de datos, actualizaciones de software, etc., y, sobre todo, garantizar que la información derivada de sus aplicaciones directas garantice la interoperabilidad, definida como *“la capacidad de los sistemas de información y de los procedimientos a los que éstos dan soporte, de compartir datos y posibilitar el intercambio de información y conocimiento entre ellos”*. (Bernabé & López, 2012)

4.4. El Desarrollo Sostenible

Otro reto de los países es abordar la planificación desde los SIG, como mejor estrategia, desde una perspectiva sostenible. Las condiciones ambientales actuales han obligado a poner de moda el desarrollo sostenible. Es la mejor moda impuesta y obligada que existe hoy día sobre la que hay que asumir en serio.

La planificación hidrológica, en concreto, aborda un tema esencial: la construcción de infraestructuras (si ya existen, la gestión para posibilitar su ampliación, adecuación, modificación, etc.) para retener el agua que fluye por los ríos hacia un punto de confluencia y así, garantizar el abastecimiento para las distintas actividades antrópicas, principalmente. Con ello, aprovechar su potencial para la generación de energía eléctrica.

“La cartografía adopta un protagonismo cada vez más fuerte en las sociedades modernas” (Crespo¹, 2007), por lo que la contribución del SIG y todos sus motores que lo nutren, constituyen una iniciativa fundamental en el logro de objetivos de la planificación hidrológica con enfoque sostenible.

La planificación hidrológica, de manera inmediata, puede identificar dos maneras claras de sostenibilidad: las políticas orientadas a controlar las actuaciones de los agentes contaminantes que hacen que el agua se deteriore en el tiempo, reduciendo así, la calidad de las aguas que necesitarán las generaciones venideras; por otro lado, el uso de la tecnología hidroeléctrica como una de las alternativas que contribuye al desarrollo sostenible, en cuanto

¹ Crespo Iglesias X., Presidente de FEGAMAP. Tomado del prólogo del libro: “Cartografía: Herramienta para el desarrollo sostenible”.

provee mecanismos de abastecimiento eléctrico que no sugiere la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, responsables del efecto invernadero, etc.

El concepto de sostenibilidad es amplio, y puede parecer ambiguo por sus distintas maneras de abordarse y aplicarse a uno u otro contexto. Sin embargo, el mensaje es claro y único: transición del uso de recursos no renovables al uso de recursos renovables, como el agua, el viento, la luz solar, la biomasa, etc.

La ONU (2016) define el desarrollo sostenible como *“la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”*. (Informe Brundtland, 1987).

Un referente acerca de la sostenibilidad en relación con el agua y la planificación hidrológica en el contexto español es: *“El balance eléctrico peninsular de abril 2016 muestra una cobertura de la demanda del 27,3% cubierto con energía hidráulica”*. (www.iagua.es, 2016)

Lo importante del asunto es conjugar la planificación hidrológica y el desarrollo sostenible con los buenos gobiernos: la democracia tiene el poder de cambiarlo todo.

Un referente mundial en cuanto al tema del aprovechamiento del agua en la generación hidroeléctrica es la mayor hidroeléctrica del mundo en producción de energía: ITAIPU Binacional: gran represa del río Paraná en la confluencia fronteriza de Brasil y Paraguay: *“Itaipu Binacional es líder mundial en la producción de energía limpia y renovable, y suministra alrededor del 15% de la energía consumida en Brasil y el 75% de la utilizada en Paraguay”*. (www.itaipu.gov.py, 2016)



Figura 2. ITAIPU BINACIONAL Hidroeléctrica (Brasil – Paraguay). Fuente: *Elaboración propia.*

Tan importante es la planificación hidrológica como el uso sostenible del recurso hídrico que las dos tienen que caminar en la misma dirección, y trabajar de manera articulada, para lograr la conservación del agua en el tiempo.

Mientras que el desarrollo sostenible se ocupa de visualizar “el mejor” punto de equilibrio posible entre la intersección de las esferas que integran lo social, lo económico y lo medio ambiental, la planificación hidrológica establece las pautas para la materialización de acciones concretas, regidas por políticas y normas claras focalizadas, para que dicho desarrollo sostenible sea posible en el tiempo, y garantizar así la conservación del agua.

Sin la planificación hidrológica el desarrollo sostenible del agua estaría a la deriva de los infinitos y perversos intereses de los hombres, por lo que no sería viable un adecuado desarrollo sostenible del agua. La ley, es hoy día el instrumento rector de las actuaciones de la especie humana que vigila todo lo que está a su alcance y sus relaciones. La planificación hidrológica es ley, la ley hace posible la sostenibilidad de los recursos, y la sostenibilidad de los recursos garantiza que las futuras generaciones puedan también disfrutar dignamente de él.

Atendiendo a este orden de ideas, es la utilización normalizada del agua “el punto caliente” que establece directamente la conexión y engranaje entre la planificación hidrológica y el desarrollo sostenible.



Figura 3. SIG, Planificación y Desarrollo Sostenible. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

El proyecto que aquí conviene pensar es: "Plan Hidrológico Sostenible". Para ello, el papel de la cartografía es fundamental en el logro de los objetivos principales: desde el contexto inmediato enmarcado dentro de los propósitos y alcances del presente proyecto, la caracterización física del territorio superficial, en formato SIG, es el primer paso para dar soporte a los análisis espaciales requeridos en la consecución de subproductos de importancia hidrológica, principalmente.

No existe otra manera más fácil y eficiente de contribuir al desarrollo sostenible del agua que la que se obtiene mediante la formulación de planes hidrológicos basados en el conocimiento y reconocimiento del medio ambiente desde la perspectiva cartográfica y SIG. Luego, de acuerdo con Konecny (2007), es preciso insistir que *"la cartografía es el soporte principal en los proyectos de desarrollo sostenible"*.

La Asociación Internacional de Cartografía (ICA) ha diseñado planes estratégicos y adelanta acciones concretas para dar soporte cartográfico en la solución de problemas medioambientales, principalmente. Cabe acuñar aquí la importancia de estas iniciativas a nivel mundial para fomentar el uso de la cartografía y los SIG como herramientas fundamentales en el desarrollo sostenible.

Según Konecny (2004), y teniendo en cuenta los principales campos en los que debe incursionar la cartografía como soporte principal en proyecto de desarrollos sostenible, *"es el campo "Sociedad" el más importante"*. Algunos

acontecimientos en materia de desarrollo sostenible se han llevado a cabo para evidenciar la necesidad, cada vez más urgente, de adoptar conductas sostenibles.

- Estocolmo (1972): la necesidad urgente de responder al problema del deterioro del medioambiente.
- Río de Janeiro (1992): la protección del medioambiente, el desarrollo económico y social son fundamentales para el desarrollo sostenible, fue el comienzo de conceptos como: Agenda 21 y el Mapa Global.
- Johannesburgo (2002): se organiza la Cumbre Mundial del Desarrollo Sostenible (WSSD) y tiene lugar otra cumbre la Conferencia mundial sobre la Sociedad de la Información. (2003,5- Ginebra, Túnez).
- Cumbre del Clima París (2015) – COP21: Cerca de 200 países se reúnen para fijar compromisos claros en la lucha por frenar el calentamiento global.



Figura 4. Cartografía y SIG: soporte principal en los proyectos de desarrollo sostenible. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Importante resaltar los acontecimientos llevados a cabo en el 2003, cuando se celebra la Conferencia Mundial sobre la Sociedad de la Información, y en ella resalta, una vez más, la importancia de las geotecnologías en la contribución de soluciones de problemáticas medioambientales, control y seguimiento de cambios para la focalización de soluciones oportunas, en el que se destaca “promover el desarrollo y el amplio uso de tecnologías de observación de la tierra incluyendo satélites de observación de la Tierra por Teledetección (RS), mapas globales y GIS”. (Konecny, 2007)

4.5. Normatividad en la planificación hidrológica

El 25 de abril de 1902 surge el arte de Planificación Hidrológica en España, cuando *"es aprobado el primer Plan Nacional de Obras Hidráulicas en España"* (MMA, 1997), cuyo territorio de acción, desde el punto de vista físico y geopolítico (gestión), se focaliza en la Cuenca Hidrográfica.

Más tarde, desde los inicios del arte de la Planificación en España, que datan desde los años 1900, la autoridad competente española identifica la necesidad de acuñar la concepción de subcuenca, como unidad básica de estudio, 100 años después cuando se oficializa el concepto por medio de Real Decreto Legislativo, en el año 2007.

Hasta el año 1996 se empiezan a sentar las bases de la Planificación Hidrológica, mediante procesos de descentralización del tema y asignaciones de responsabilidades estatales organizativas bajo estructuras de Confederaciones Oficiales para la gestión de Cuencas. En el año 2001, por medio del Real Decreto Legislativo (RDL) 1/2001, es aprobado el Plan Hidrológico del Duero, y posteriormente validado por el RDL 1/2016, a lo que corresponde de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero para el periodo 2015 – 2021.

La planificación hidrográfica de España gira en torno a los lineamientos de la Directiva Marco Europea del Agua (DMA – Directiva 2000/60/CE) que nace como respuesta a la necesidad de unificar las actuaciones en materia de gestión del recurso agua en la Unión Europea con miras a proteger el recurso y garantizar su sostenibilidad. La adaptación de esta directiva en España se realizó mediante la Ley 62/2003 la cual modificó el texto de la Ley de Aguas aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, e incorporó la Directiva 2000/60/CE al derecho español estableciendo así un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

Con el propósito de dar un uso armónico y coordinado de los recursos hídricos en España, se dicta el Plan Hidrológico Nacional aprobado mediante la Ley 10/2001, siendo modificado posteriormente por la Ley 11/2005.

El 02 de febrero de 2007, se fija el ámbito territorial de las demarcaciones hidrográficas de cuenca, dictadas por el Real Decreto Legislativo 125/2007.

Dicho Plan Hidrológico Nacional contiene las medidas necesarias para la coordinación de los diferentes planes hidrológicos de cuenca, por consiguiente, éste sostiene las bases del Plan Hidrológico de la parte Española de la demarcación hidrográfica del Duero (Cuenca del Duero), enmarcado dentro de los Planes Hidrológicos de cuenca del segundo ciclo (2015 – 2021), aprobado por el Real Decreto 1/2016.

Como instrumento de Planificación Hidrológica actual vigente y proyectado, todas las actuaciones respecto al uso, demanda, consumo y retorno del agua en la subcuenca del río Adaja se rigen por el siguiente documento técnico legislativo: "Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación

hidrográfica del Duero para el periodo comprendido entre 2015 y 2021”. Este documento contiene un compendio de 178 mapas, dentro de los cuales se encuentra caracterizada la zona de estudio a nivel de Cuenca (zona de influencia de la parte española del Río Duero), con todo lo que compete al marco físico en cuanto a aspectos ambientales, sociales, climáticos, topográficos, geológicos, etc.

El aporte del presente proyecto gira en torno a exponer una caracterización superficial a nivel de subcuenca sobre la zona de influencia del cauce principal del río Adaja, y contempla la consolidación en formato SIG de una base de datos geográfica estructurada y sólida, oportuna para derivar, por medio del análisis espacial, productos con un nivel de detalle superior, a fin de promover la formulación de futuros Planes Hidrológicos focalizados para vigilar “más de cerca” las actuaciones respecto al uso del agua.

Este marco físico es la base para derivar información relacionada con variables hidrológicas de interés, y aunque dichos análisis hidrológicos no se encuentran contemplados dentro del alcance del presente proyecto, es importante tener referencia de la Nueva Norma 5.2-IC de Drenaje Superficial de la Instrucción de Carreteras, como instrumento técnico para profundizar en el conocimiento de la dinámica del agua superficial y sus interacciones con los factores climáticos.

A continuación, se relacionan algunos indicadores relacionados con el consumo y la demanda del agua en España:

En el año 2008, la demanda rondaba los 730 metros cúbicos por habitante al año, según la siguiente fuente extraoficial (Figura 5). Para este entonces, y según las cifras oficiales (Figura 6), la demanda rondaba los 760 metros cúbicos por habitante al año.

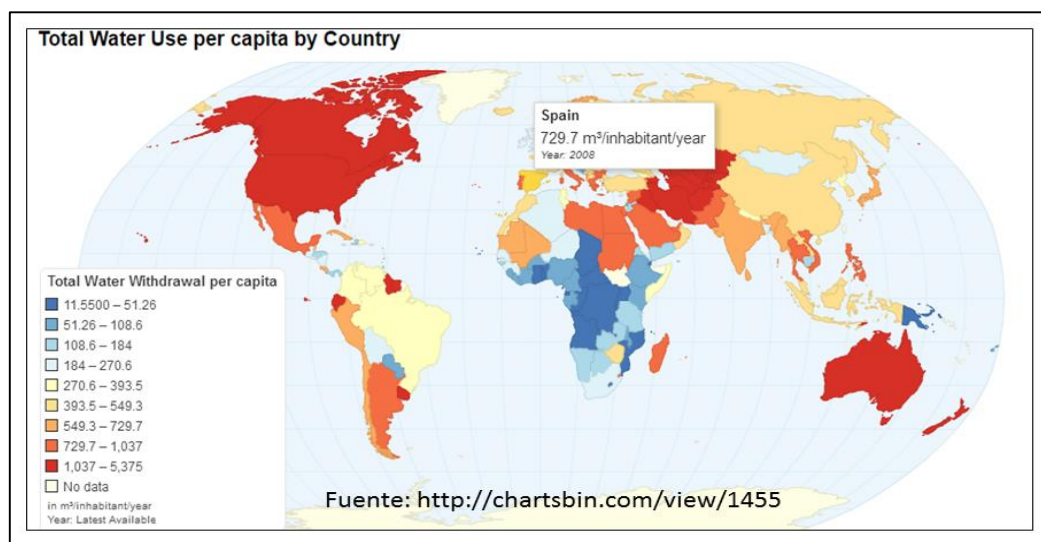


Figura 5. Demanda de agua en m³/habitante/año.

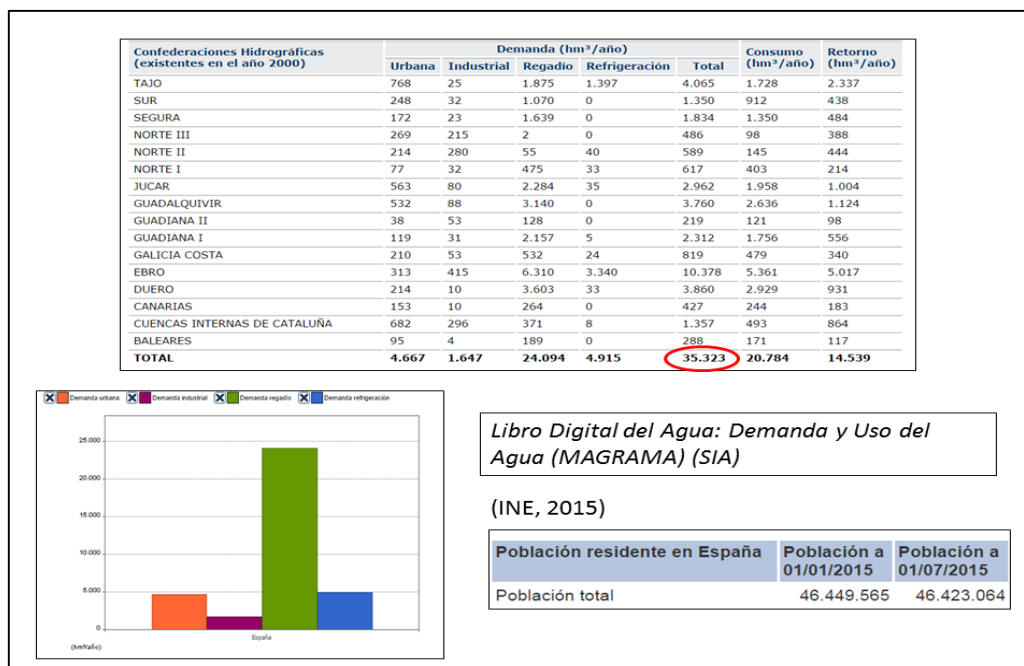


Figura 6. Demanda, consumo y retorno de agua (hm³) / año. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

En la tabla anterior se muestra el consumo y el retorno estimados para cada confederación hidrográfica en hm³/año. El consumo es la parte de la demanda que no retorna al sistema hidráulico; la diferencia entre la demanda y el consumo es el retorno, que es el volumen que se reincorpora al sistema hidráulico.

Según la reserva hidráulica española, en el año 2015 hay 31.336 hm³ de agua embalsada, para cubrir una demanda per cápita de 760 m³/año por habitante (46.449.565 habitantes en España según el INE, 2015), correspondiente a un total de 35 mil hm³/año, con solo el uso del 56% de la capacidad total de embalse.

Esto sugiere que el panorama hidráulico para la satisfacción de las necesidades primarias de los habitantes son bastantes alentadoras.

En lo que respecta a la cuenca hidrográfica del Duero, para el año 2015 tan solo el agua embalsada en la cuenca ascendía a un poco más de la mitad de su capacidad total (un 57%).

- AMBITOS	- RESERVA TOTAL EMBALSADA			
	Capacidad Total	Año Actual	Año Anterior	Media 10 Años
Cantábrico Oriental	79	49	52	49
Cantábrico Occidental	554	365	289	352
Miño-Sil	3.030	1.825	1.734	1.751
Galicia Costa	684	475	446	365
Cuencas internas del País Vasco	21	14	14	15
Duero	7.507	4.312	4.882	4.064
Tago	11.012	4.894	5.639	5.049
Guadiana	9.266	6.051	6.448	5.217
Tinto, Odiel y Piedras	229	158	161	165
Guadalete-Barbate	1.651	1.072	1.216	926
Guadalquivir	8.101	4.859	5.873	4.170
Vertiente Atlántica	42.134	24.074	26.754	22.123
Cuenca Mediterránea Andaluza	1.177	579	683	529
Segura	1.141	480	679	407
Júcar	3.337	1.186	1.306	1.062
Ebro	7.511	4.548	4.811	3.726
Cuencas internas de Cataluña	677	469	571	448
Vertiente Mediterránea	13.843	7.262	8.050	6.172
Total peninsular	55.977	31.336	34.804	28.295

MAGRAMA (2015)

Figura 7. Reserva total de agua embalsada en España por cuenca hidrográfica.

5. CONTEXTO GENERAL

En el presente capítulo se aborda el contexto general de la zona de estudio que incluye su concepción desde el ámbito de cuenca y subcuenca como unidades básicas de Planificación Hidrológica. Adicionalmente, se hace un recorrido acerca de las delimitaciones actuales dispuestas por el MAGRAMA en recursos cartográficos disponibles en la Web, algunas ilustraciones acerca de las demarcaciones hidrográficas para fines de gestión en España, así como características generales de la cuenca del Duero y la subcuenca del río Adaja, dispuestas por la Confederación Hidrográfica del Duero.

5.1. Contexto general de la zona de estudio

Es preciso referenciar, antes de abordar la caracterización de los límites de la zona de estudio, algunos conceptos acerca de cuenca hidrográfica y subcuenca. Además de caracterizar los límites del área de interés para el presente objetivo, se hará una revisión de los recursos cartográficos dispuestos en la Web por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, desde sus distintas concepciones físico y político administrativo (ámbitos de gestión), con el propósito de elegir, ajustar y definir el perímetro definitivo a utilizar como referencia cartográfica a lo largo y ancho de los productos a consolidar.

La ley de Aguas española define cuenca hidrográfica como *"la superficie de terreno cuya escorrentía superficial fluye en su totalidad a través de una serie de corrientes, ríos y eventualmente lagos hacia el mar por una única desembocadura, estuario o delta"*.

Como se ha mencionado anteriormente, surge la necesidad de acuñar el término de subcuenca como subdivisión topográfica de la cuenca, y aunque en el RDL 1/2001 (artículo 16) se afirma que la *"la cuenca hidrográfica como unidad de gestión del recurso se considera indivisible"*, por su parte el RLD 907/2007 (artículo 3) define subcuenca como *"la superficie de terreno cuya escorrentía superficial fluye en su totalidad a través de una serie de corrientes, ríos y, eventualmente, lagos hacia un determinado punto de un curso de agua (generalmente un lago o una confluencia de ríos)"*.

Es claro entonces que la cuenca y la subcuenca son consideradas unidades de gestión definidas, en principio, por la orografía del terreno, y que la diferencia para ser considerada como una u otra, es la salida del flujo en un único punto de confluencia sea al mar (cuenca), o a un cauce hídrico de mayor orden (subcuenca).

El Ministerio de Medio Ambiente de España (1997), define cuenca hidrográfica desde un punto de vista más abierto y versátil afirmando que se considera como *"la zona acotada por los márgenes del cauce de un río que se nutre del agua procedente de las precipitaciones"*.

Desde un punto de vista académico y técnico, las concepciones acerca de la cuenca hidrográfica la consideran como *“vertiente a una sección de un cauce, la superficie en la que, al caer una gota de agua, si no se evapora o se infiltra, ha de pasar por la sección”*. (Altares, 1993), mientras que Huerta (2016) considera que la cuenca hidrográfica *“es un lugar de la superficie terrestre donde todas las precipitaciones que caen sobre este, van a parar a un mismo punto de salida”*.

La cuenca hidrográfica contiene relaciones de adyacencia con otros elementos geográficos compartiendo, así, fronteras con otras cuencas hidrográficas. Dicha línea que separa dos cuencas se conoce como divisoria de agua o *“la línea imaginaria que separa una cuenca de las cuencas adyacentes”*. (Huerta, 2016)

Altares (1993) afirma que *“una cuenca hidrográfica se define por dos aspectos principales: la cuenca topográfica y la cuenca hidrogeológica”*. Para efectos del presente se usará como base la concepción de cuenca topográfica, definida estrictamente bajo criterios objetivos derivados de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

Los criterios adoptados en el presente ejercicio, para delimitar la zona de estudio (subcuenca del río Adaja), responden a criterios objetivos derivados de algoritmos que toman como base un modelo de dirección de flujo (derivado del MDE) para definir las fronteras de las mismas. Por esta razón, la delimitación final que aquí se adopte como referencia cartográfica puede presentar variaciones respecto a las dispuestas por MAGRAMA (2016).

En un apartado posterior, se describe con detalle los criterios utilizados para la delimitación de la zona de estudio.

Otro aspecto a tener presente es que se tomará como referencia todas las cuencas hidrográficas topográficas (denominadas subcuencas teniendo en cuenta que los puntos de confluencia de las aguas están orientados hacia un drenaje de orden superior y no hacia al mar) derivadas de un MDE que se encuentran asociadas, de manera directa, a todo el cauce principal del río Adaja (desde su nacimiento hasta su desembocadura). Esta condición sugiere unificar varias fronteras, con la particularidad de que todas drenan sus aguas hacia un único punto de confluencia (desembocadura del río Adaja en el río Duero).

En un sentido amplio del arte de la planificación hidrológica, el MMA (1997) considera que *“la cuenca hidrográfica se toma como unidad a la hora de llevar a cabo una ordenación de los recursos del agua”*, no obstante, lo anterior, cabe insistir que la planificación hidrológica podría ofrecer un mayor detalle y focalización de acciones si se analiza *“más de cerca”* utilizando propuestas de planificación orientada a subcuencas.

5.2. Delimitación Cartográfica Actual. Recursos disponibles.

El MAGRAMA actualmente dispone de un servicio Web de descargas del Área de Actividad del Agua. En la opción "Capas Generales" puede extraerse el recurso en formato vectorial relacionado con:

Cuencas y Subcuencas Hidrográficas:

- Cuencas hidrográficas de los principales ríos definidos en el artículo 3 de la Directiva Marco del Agua (DMA). (1:25.000). Actualización: enero de 2006.
- Subcuencas de las masas de agua superficiales de la DMA (artículo 5). (1:25.000). Actualización: enero de 2006.
- Subcuencas de los cauces de la red hidrográfica básica. (1:25.000). Actualización: enero de 2006.

Demarcaciones hidrográficas y Organismos de Cuenca:

- Demarcaciones hidrográficas (planes hidrológicos 2016-2021, ámbito terrestre). (1:25.000). Actualización: marzo de 2015.
- Demarcaciones hidrográficas (planes hidrológicos 2016-2021). (1:25.000). Actualización: marzo de 2015.
- Ámbitos de gestión de los organismos de cuenca. (1:25.000). Actualización: marzo de 2015.

Hidrografía:

- Ríos principales del territorio definidos en el artículo 3 de la DMA. (1:25.000). Actualización: enero de 2007.
- Red hidrográfica básica procedente MDT 100x100. (1:25.000). Actualización: enero de 2007.
- Red de canales principales. (1:25.000). Actualización: enero de 2007.

Revisando detenidamente los productos disponibles establecidos por MAGRAMA, para efectos del presente trabajo, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

Hay diferencias en las capas de información con los perímetros dispuestos definidos para las cuencas topográficas y las demarcaciones hidrográficas para efectos de gestión.

Sin embargo, para el caso particular de la Cuenca del Duero, los límites definidos (desde las perspectivas topográficas y de gestión) no presentan diferencias, como puede apreciarse en la siguiente figura:

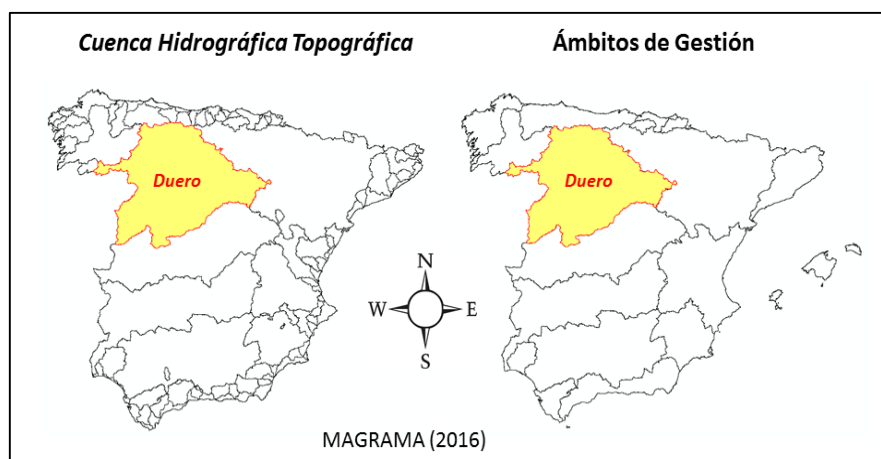


Figura 8. Cuenca Hidrográfica del Duero. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Las tres (3) capas de información geográfica que hacen referencia a “Demarcaciones hidrográficas y organismos de cuenca” presentan un contenido similar. La capa de información correspondiente a “Subcuencas de los cauces de la red hidrográfica básica”, escala 1:25.000, actualización: enero de 2006 (MAGRAMA, 2016), es la información de referencia que se tomará como base para ajustar el perímetro final de la zona de estudio elegido para el presente objetivo. Los ajustes se derivan de una revisión objetiva de procesos automatizados definidos por el software elegido para la delimitación de cuencas topográficas con base a MDT de varias resoluciones espaciales (5, 25 y 200 m). Las subcuencas del MAGRAMA han sido obtenidas a partir de un MDT de 100 x 100 metros de longitud de celda. Con base a la comparación de los resultados de las cuatro (4) fuentes (MDT de 5, 25, 100 y 200 m), se elegirá el perímetro final de referencia cartográfica a utilizar.

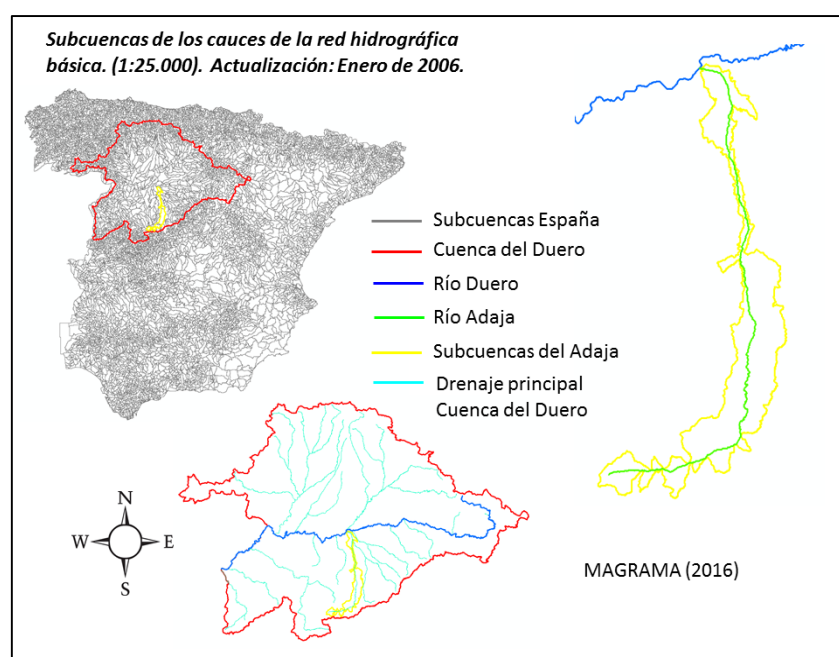


Figura 9. Subcuencas de los cauces de la red hidrográfica básica. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

MAGRAMA ha identificado 14 zonas o subcuencas correspondientes al cauce de la red hidrográfica principal del río Adaja. La unificación de las 14 delimitaciones, es lo que corresponde a la subcuenca del Adaja, como única área que ronda y escurre sus aguas hacia el cauce principal del río, y que la canaliza hasta llevarla a un solo punto de confluencia (desembocadura).

En la siguiente figura se ilustran las zonificaciones que ha definido el MAGRAMA:

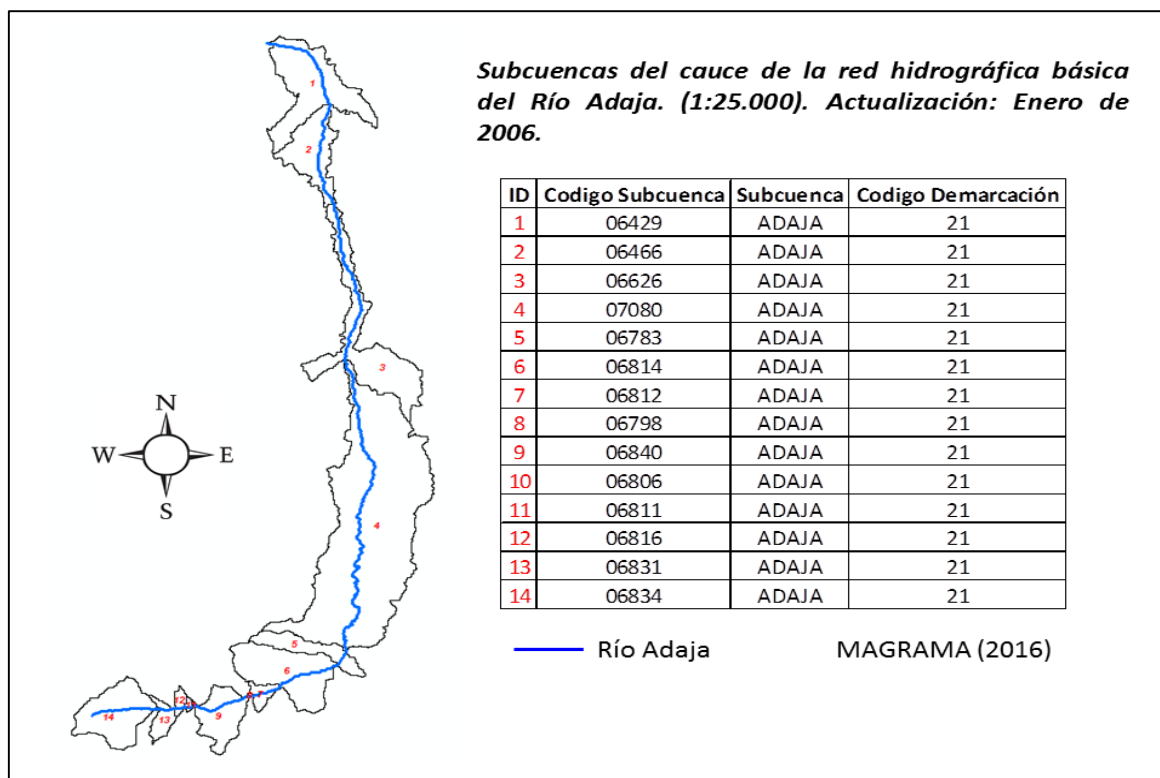


Figura 10. Subcuencas hidrográficas asociadas al cauce principal del Río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

La red hidrográfica del MAGRAMA (escala 1:25.000) no se tendrá en cuenta para la consolidación de la Base de Datos Geográfica, porque se consultará otra fuente oficial de la Junta de Castilla y León, con la hidrografía a escala 1:10.000, la cual se detalla en un capítulo posterior.

5.3. Cuencas de España (Demarcaciones Hidrográficas)

El 02 de febrero de 2007, mediante el Real Decreto Legislativo 125/2007, se fija el ámbito territorial de las demarcaciones hidrográficas en España, el cual se ilustran en la siguiente figura:

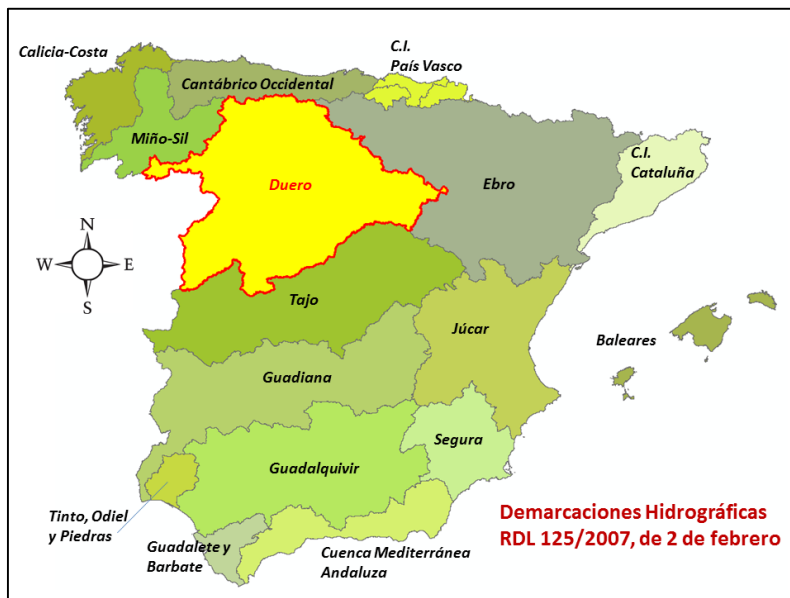


Figura 11. Demarcación hidrográfica establecida en el RDL 125/2007.
Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Los principales ríos de España, dentro de los cuales se encuentra el río Duero, se muestran a continuación, y han sido extraídos de ficheros vectoriales del MAGRAMA (2016):



Figura 12. Principales ríos de España. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

5.4. Características Generales de la Cuenca del Duero

La cuenca hidrográfica del Duero tiene participación territorial en dos países: España y Portugal, y ocupa una extensión superficial de 98.073 km² según la CHD (2016). El 80% de su territorio corresponde a la parte Española y el 20% a Portugal. La Confederación Hidrográfica del Duero es la responsable de los 78.859 km² correspondientes al ámbito territorial administrativo de la parte española de la demarcación oficial.

En la siguiente figura se ilustra la zona de territorio que corresponde a España y Portugal:

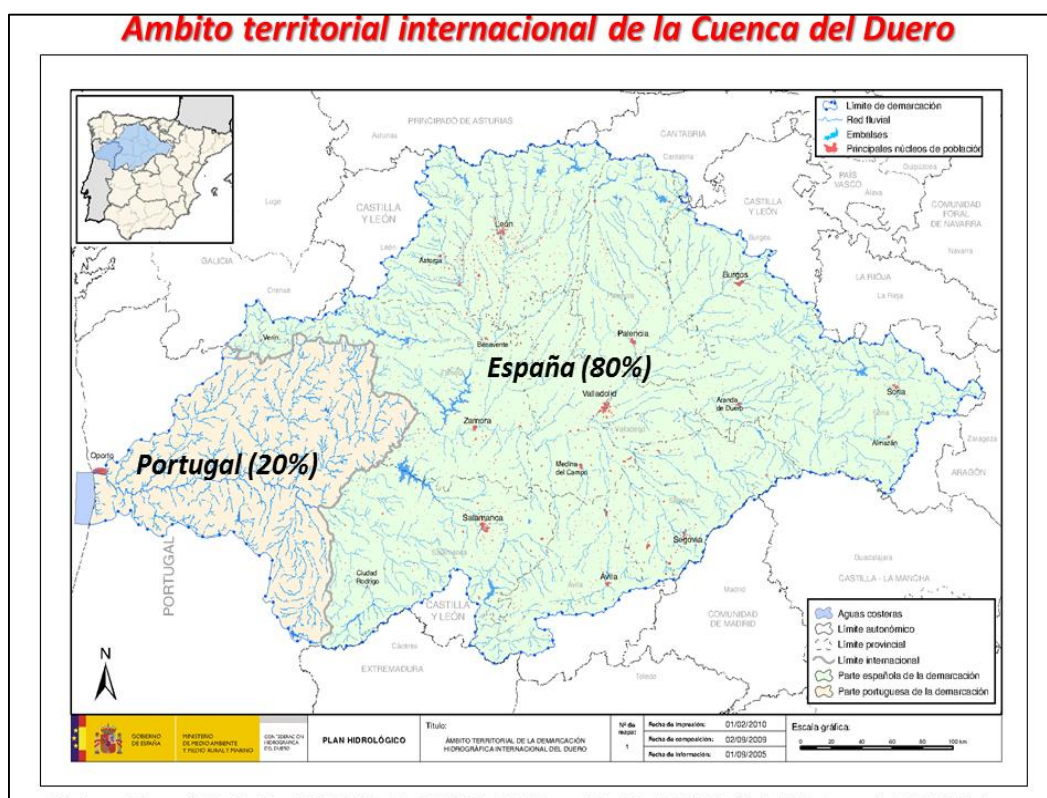


Figura 13. *Ámbito territorial internacional de la Cuenca del Duero. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.*

Las aguas de la cuenca del Duero proveniente de los sistemas del Tormes, Huebra y Águeda, vierten su fluido directamente al tramo internacional de la cuenca.

La cuenca del Duero correspondiente a la parte española está localizada en la parte nor-occidental de España, y representa una de las cuencas más importantes de la península.



Figura 14. Cuenca del Duero. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Su territorio involucra la participación de varias comunidades autónomas de España. El 98,25 % del total de la superficie de la cuenca en España corresponde a la comunidad autónoma de Castilla y León.

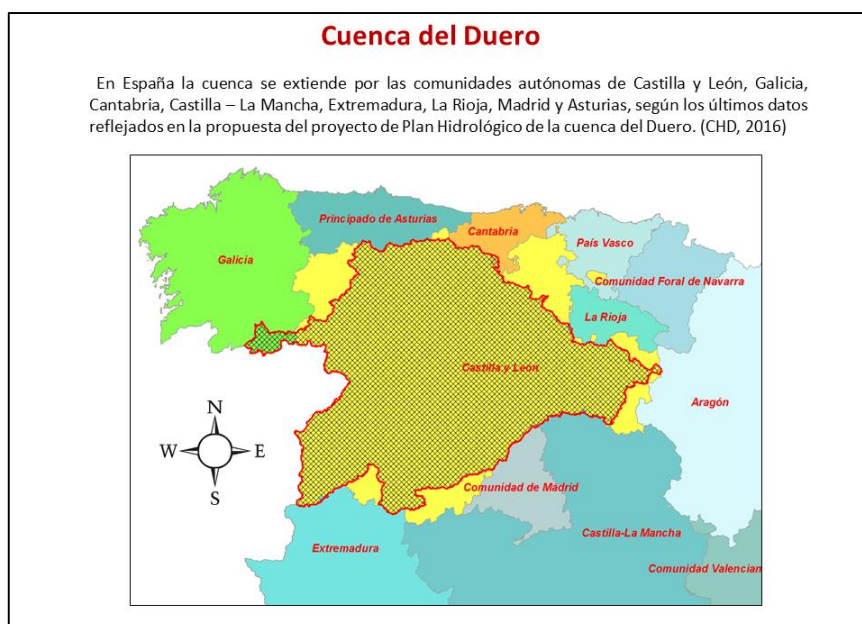


Figura 15. Localización de la cuenca del Duero y Comunidades Autónomas. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

En la siguiente figura se puede apreciar la participación en área y porcentaje de cada una de las comunidades autónomas presentes en la cuenca del Duero, así como la proporción de población y núcleos urbanos:

Comunidad autónoma	Superficie (km ²)	%	Población (hab)	%	Núcleos urbanos	%
Castilla y León	77.482,39	98,25	2.173.279	98,56	4.729	96,12
Galicia	1.134,02	1,44	30.498	1,38	169	3,43
Cantabria	97,89	0,12	1.346	0,06	21	0,43
Castilla-La Mancha	62,01	0,08	0	0,00	2	0,02
Extremadura	42,95	0,05	0	0,00	0	0,00
La Rioja	20,75	0,03	0	0,00	0	0,00
Madrid	15,67	0,02	0	0,00	0	0,00
Asturias	2,70	0,00	0	0,00	0	0,00
TOTAL	78.858,51		2.205.123		4.921	

CHD (2016)

Figura 16. Porcentaje de territorio que ocupa la cuenca del Duero en las Comunidades Autónomas.

La red fluvial principal de la cuenca del Duero, según la cartografía a escala 1:25.000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) se muestra en la siguiente figura. En la cuenca del Duero la red de drenaje en esta escala de representación gráfica “alcanza una longitud de unos 83.200 km, de los que 13.491 km han sido identificados como masas de agua”. (CHD, 2016)

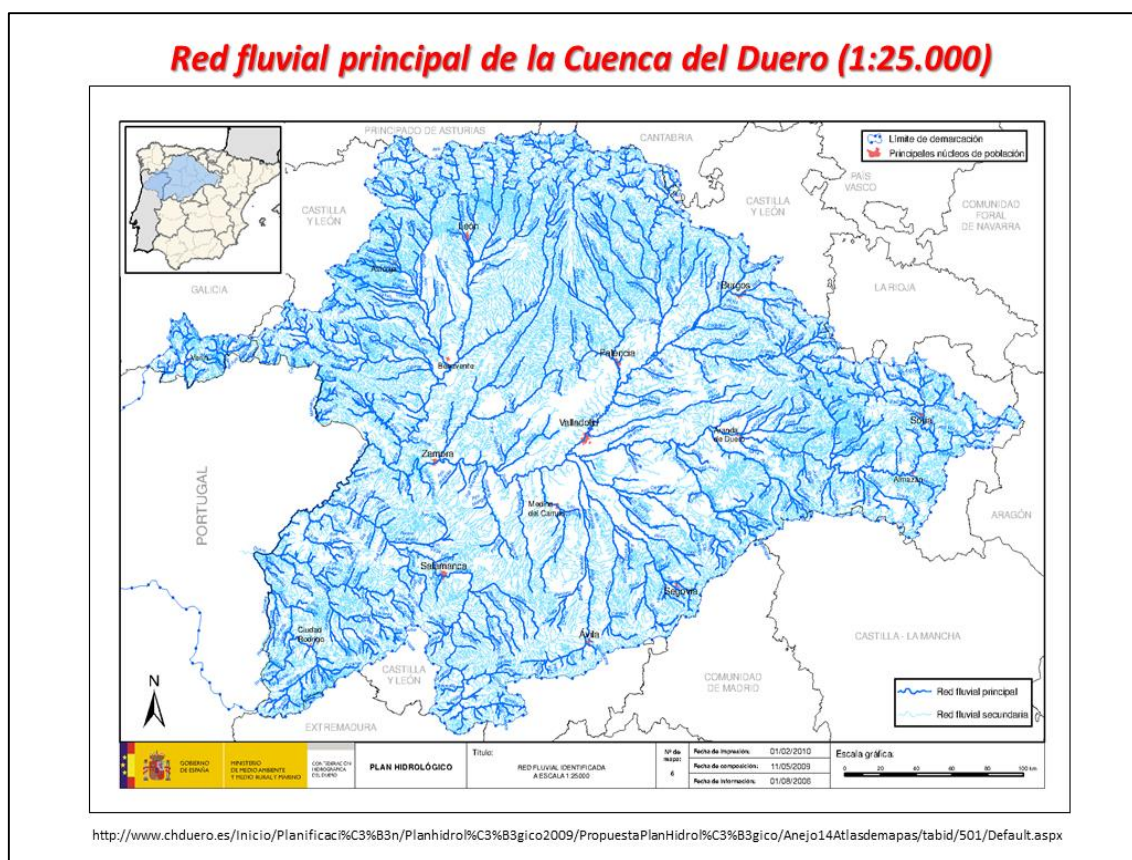


Figura 17. Red fluvial principal de la cuenca del Duero. Fuente: CHD.

Algunos aspectos relacionados con las series de vegetación de la cuenca del Duero se ilustran en la siguiente figura:

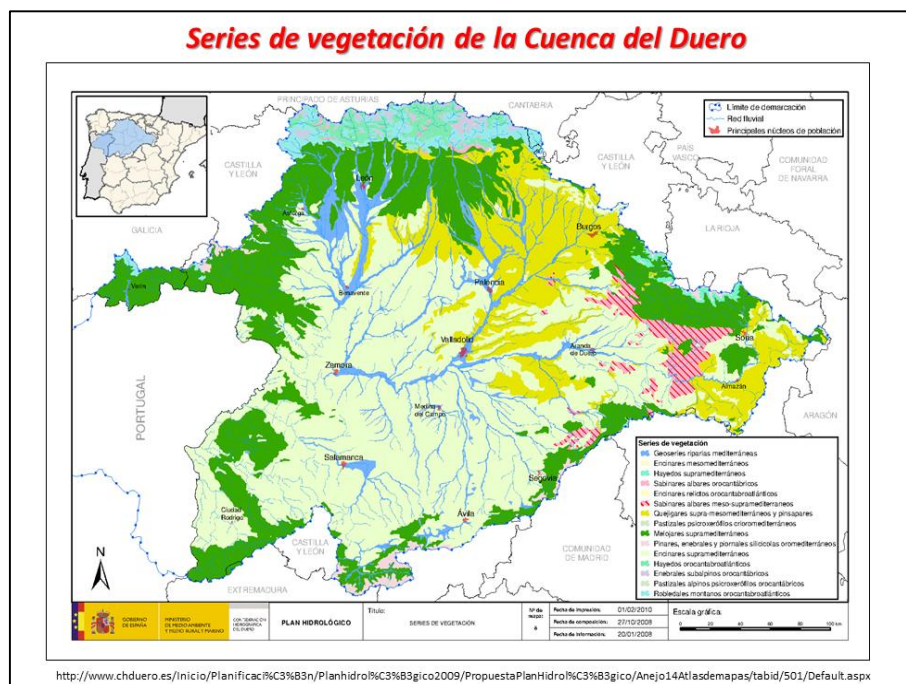


Figura 18. Series de vegetación de la cuenca del Duero. Fuente: CHD.

MAGRAMA (2015) ha estimado la capacidad total de agua embalsada en la cuenca del Duero en 7.507 hm³. En la siguiente figura se muestra la distribución de los principales embalses al interior de la cuenca:

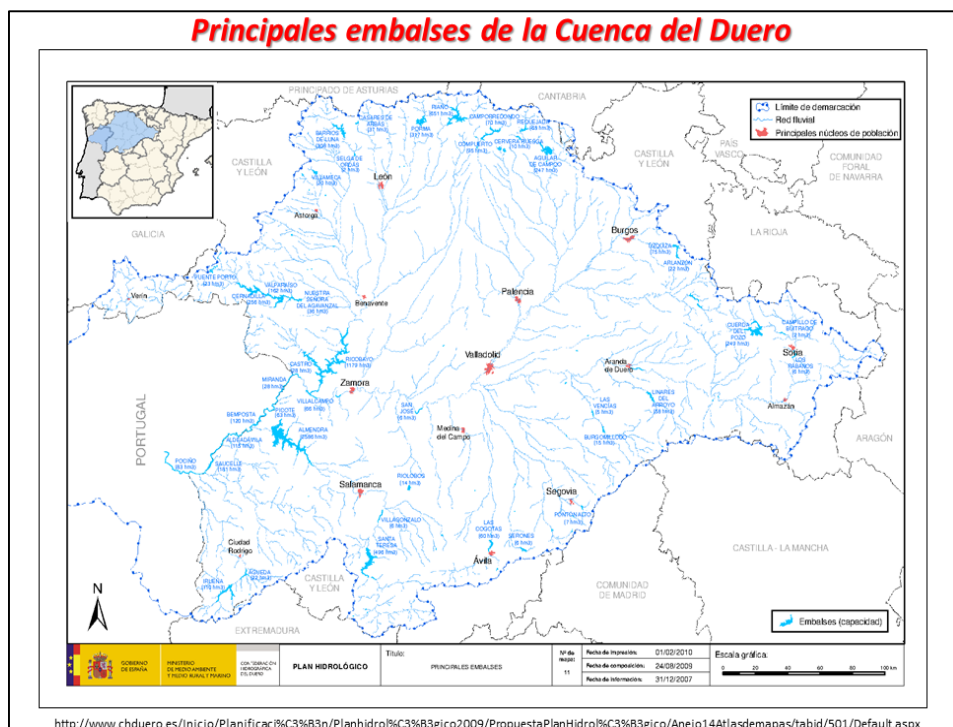


Figura 19. Principales embalses de la cuenca del Duero. Fuente: CHD.

De manera general, el relieve de la cuenca del Duero se encuentra entre los 200 y los 2.000 m.s.n.m. Más adelante se detalla esta característica, en particular para la subcuenca del río Adaja, con base a un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), desde donde se caracteriza esta variable y otros aspectos orográficos asociados derivados del mismo. Según la CHD (2016) “La cuenca del Duero ofrece una orografía principalmente llana y elevada, bordeada por los sistemas montañosos que la enmarca y diferenciándose tres ámbitos: arco montañoso periférico, llanura central y tierras bajas portuguesas”.

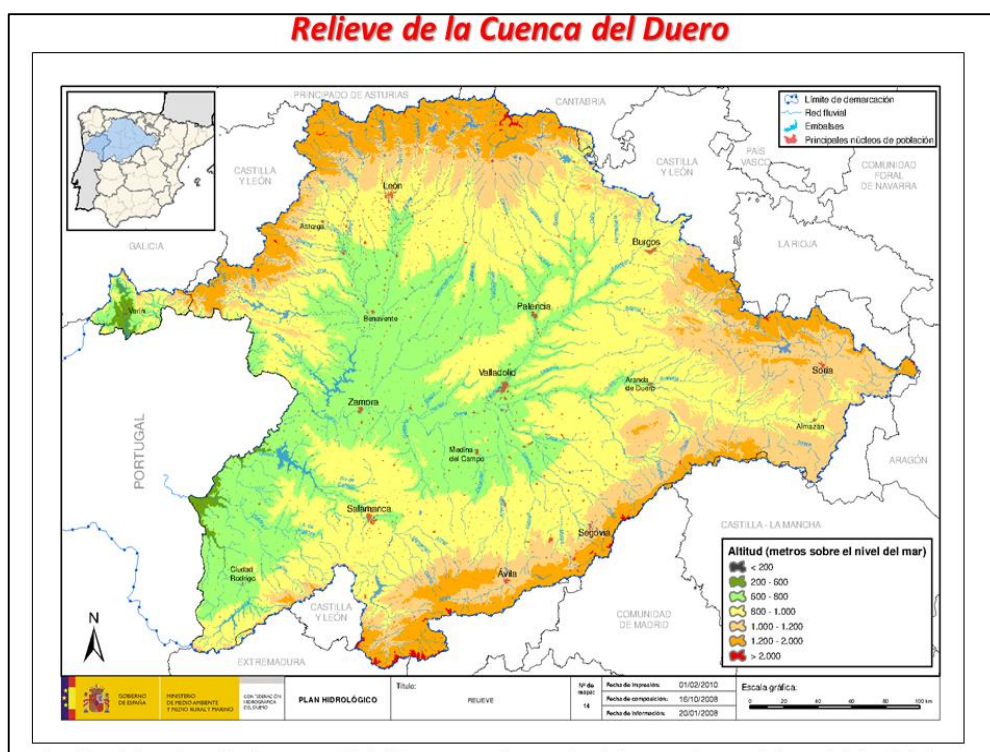


Figura 20. Relieve de la cuenca del Duero. Fuente: CHD.

De manera general, la cuenca del Duero se encuentra representada geológicamente por una unidad representativa denominada “Depresión del Duero”. En ella sobresale en gran parte la “Cuenca Terciario del Duero”, y en menores proporciones “Cordillera Ibérica”, “Granitoides hercínicos”, “Hercínico sedimentario” y “Zona Cantábrica”.

A lo que respecta a la subcuenca del río Adaja, las unidades geológicas identificadas como “Cuenca Terciario del Duero” y “Granitoides hercínicos” son las unidades representativas a esta escala.

Por su parte, la CHD (2015), en el Atlas de Mapas del Plan Hidrológico relaciona las características geológicas principales de la cuenca del Duero a mayor escala, y desde donde se extrae lo correspondiente a la zona de la subcuenca del río Adaja.

En las siguientes figuras se muestran las unidades geológicas generales de la cuenca del Duero, así como las desagregaciones en mayor escala elaborada por la CHD, y sus respectivas leyendas geológicas consolidadas.

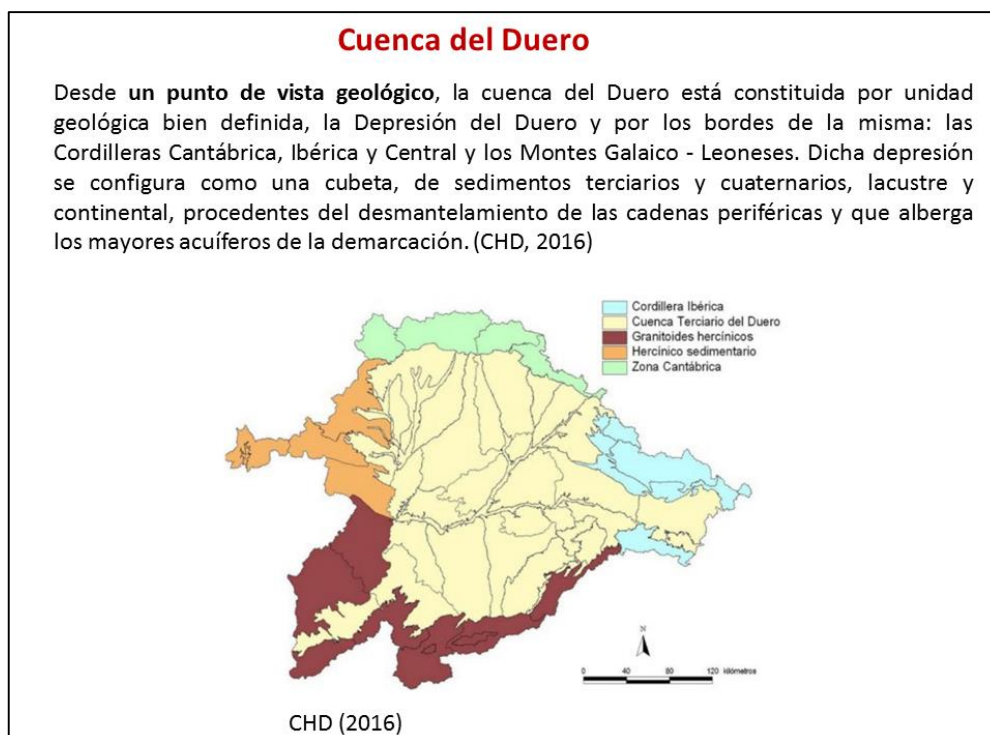


Figura 21. Aspectos Geológicos de la cuenca del Duero. Fuente: CHD.

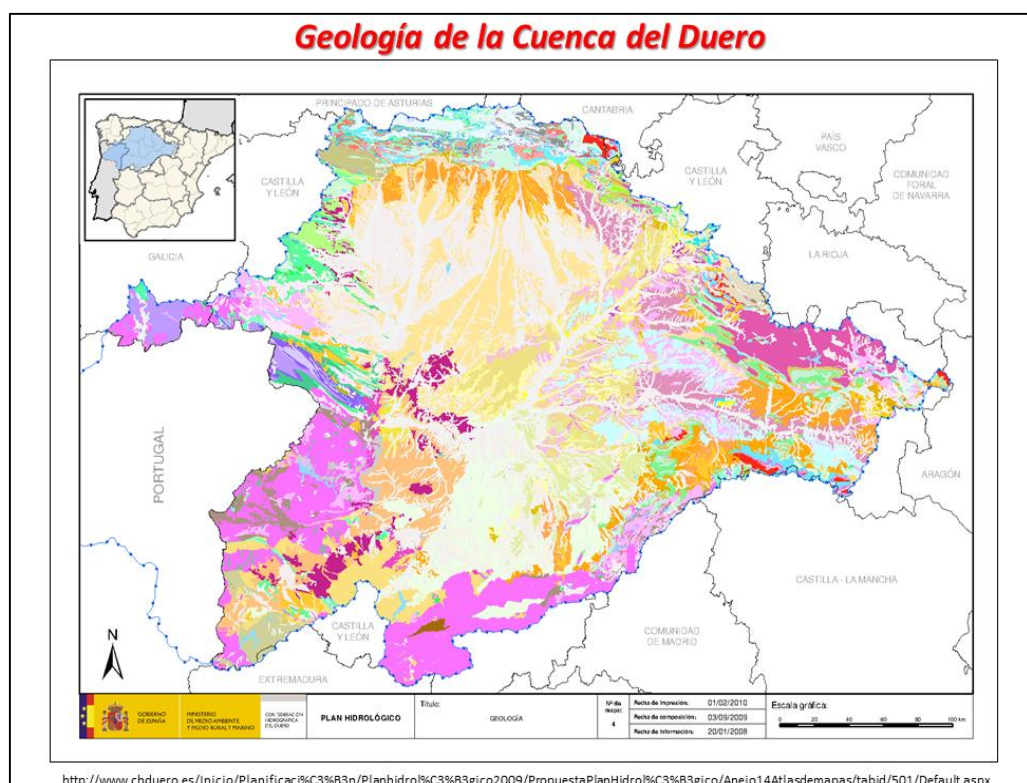


Figura 22. Geología de la cuenca del Duero. Fuente: CHD.

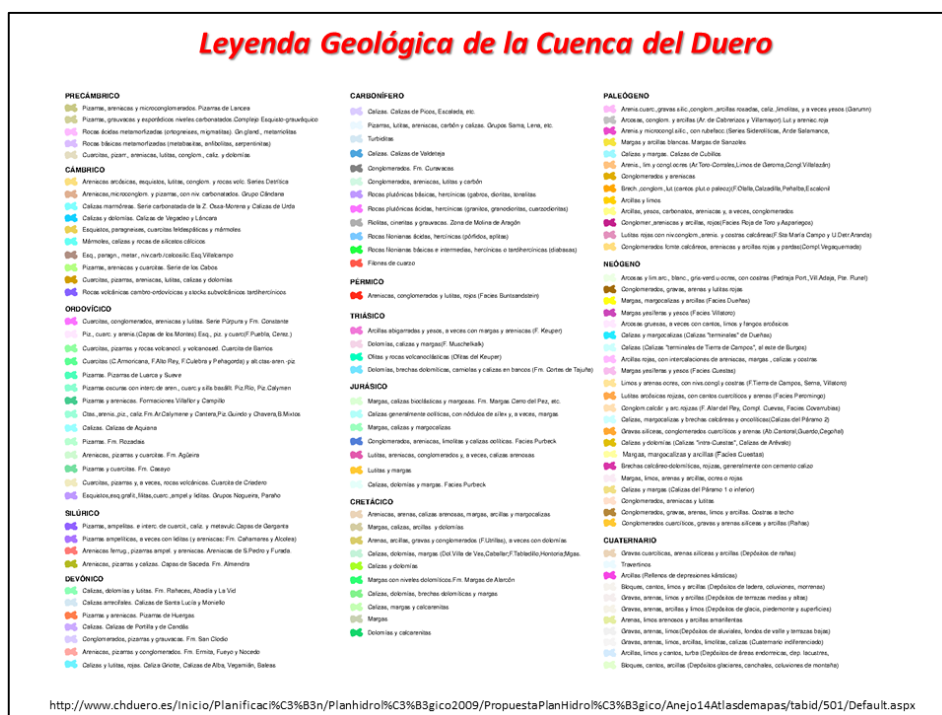


Figura 23. *Leyenda Geológica de la cuenca del Duero. Fuente: CHD.*

Por último, se ilustra la zonificación hidrológica de la cuenca del Duero, donde se puede apreciar lo correspondiente a la zona de la subcuenca del río Adaja, que, en un capítulo posterior, se detallan aspectos relacionados con sus límites específicos:



Figura 24. Zonificación hidrológica de la cuenca del Duero. Fuente: CHD.

A continuación se consolidan algunos aspectos relevantes relacionados con la reserva total de agua embalsada en la cuenca del Duero y el contraste con algunos indicadores de consumo y demanda de agua.

- AMBITOS		- RESERVA TOTAL EMBALSADA			
		Capacidad Total	Año Actual	Año Anterior	Media 10 Años
Duero		7.507	4.312	4.882	4.064

MAGRAMA (2015)

Confederaciones Hidrográficas (existentes en el año 2000)	Demanda (hm³/año)					Consumo (hm³/año)	Retorno (hm³/año)
	Urbana	Industrial	Regadío	Refrigeración	Total		
DUERO	214	10	3.603	33	3.860	2.929	931

Libro Digital del Agua: Demanda y Uso del Agua (MAGRAMA) (SIA)

Figura 25. Reserva total embalsada de la cuenca del Duero. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

5.5. Características Generales de la Subcuenca del río Adaja

El MAGRAMA ha identificado 14 zonas como subcuencas asociadas al cauce principal del río Adaja, no obstante, estas más aquellas asociadas a los cauces de los ríos Eresma y Voltoya (siendo éstos los otros dos afluentes principales), conforman la subcuenca topográfica como tal. Más adelante se definen los límites de la cuenca de drenaje del Adaja, o mejor llamada subcuenca hidrográfica del río Adaja.

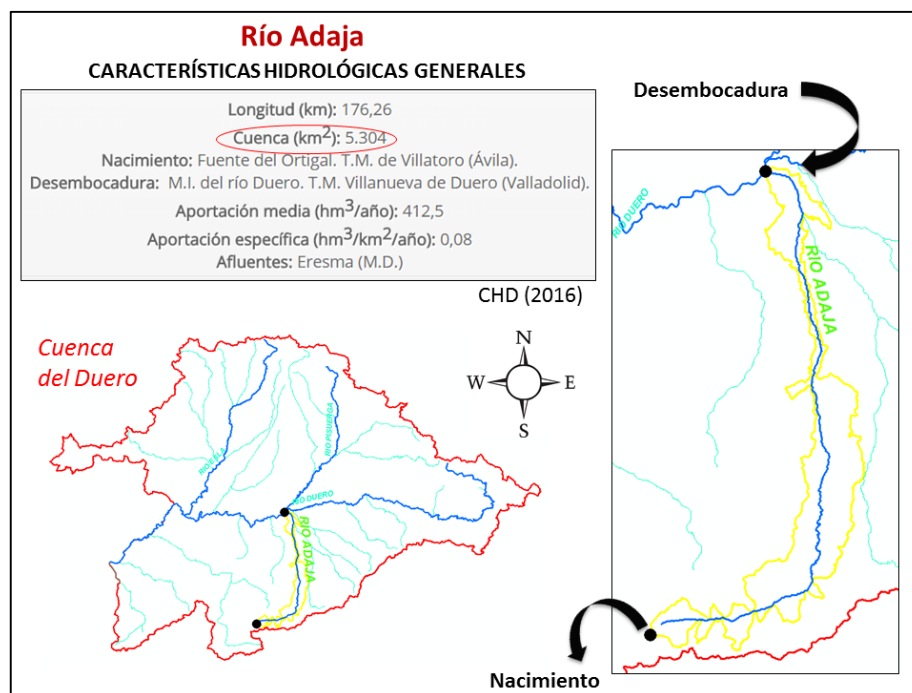


Figura 26. Características hidroclógicas generales de la subcuenca del Río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

La figura anterior muestra una referencia depositada en los escritos virtuales de la Confederación Hidrográfica del Duero, donde afirma que los límites de la Cuenca del río Adaja encierran un área de 5.304 km². Como se ha mencionado anteriormente, y como se repasará en un capítulo posterior, uno de los ejercicios a realizar es definir el área final (para efectos locales del presente trabajo) de la zona de estudio como referente cartográfico para todos los productos propuestos generar.

El cauce principal y representativo de la subcuenca es el río Adaja quien es considerado por Mongil et al. (2002) como *“el río más emblemático de la ciudad de Ávila. Nace en esta misma provincia y, tras recorrer 163,5 Km y recibir las aguas de un importante afluente como es el Eresma, desemboca en el Duero por su margen izquierda, en el municipio de Villanueva de Duero (Valladolid)”*.

En principio, el criterio inicial serán los modelos expresados mediante algoritmos matemáticos diseñados por expertos para la delimitación de cuencas hidrográficas topográficas (cuencas de drenaje), es decir, desde una perspectiva física, natural, objetiva y no asociada a cuestiones político administrativas y/o de gestión. Delimitaciones derivadas de una fuente ráster obtenidas a partir de un sensor remoto activo (MDE), con resoluciones espaciales de 5, 25, 100 y 200 metros de lado de celda.

La delimitación de la Cuenca del río Adaja (conformada por las 14 zonas o subcuencas asociadas al cauce principal de este afluente) con base al insumo MDT 100x100 m es aquel obtenido directamente del MAGRAMA, el cual será comparado con los demás, en búsqueda de la elección de la delimitación final. ¿Por qué no usar por defecto el que propone el MAGRAMA?

Es claro que insumos de mejor resolución espacial, generalmente, arrojan mejores resultados traducidos en el nivel de detalle en la representación de entidades del mundo real. No obstante, la literatura y la experiencia nos han heredado algunos aspectos a tener presente tales como que *“se suele cumplir que a altas resoluciones o tamaños de pixel reducidos se obtiene un mayor detalle en la cartografía que a tamaños de celdilla mayores”* (Peña, 2006). Sin embargo el mismo autor argumenta que *“una reducción excesiva del tamaño de pixel no conlleva ventajas en la cantidad de información que aporta, ya que la reducción en el tamaño de pixel supone introducir información redundante”*.

Al final, el MDT con mayor resolución espacial obtenido, resulta la fuente más apropiada para caracterizar la orografía del terreno de la zona de interés, así como para generar los productos derivados.

Aquí se ha elegido hacer uso de herramientas SIG especializadas en el análisis hidrológico, pensadas para delimitar cuencas y subcuencas de drenaje, entre otra multitud de funcionalidades relacionadas, y se ha elegido comparar resultados para analizar un poco las particularidades de las fronteras de las subcuencas que rodean el cauce principal del río Adaja, y observar un poco como se comporta uno y otro resultado (mismo proceso, distintas fuentes).

6. SOFTWARE, DATOS Y FUENTES DE INFORMACIÓN

En el presente capítulo se relacionan aspectos principales acerca del software SIG utilizado para el tratamiento de la información geográfica, la extracción de información derivada de fuentes ráster y vector, así como para la generación de las salidas gráficas finales. Posteriormente, se detallan aspectos relacionados con los datos, los fundamentos de estructuración y los modelos apropiados para el almacenamiento y representación de los mismos. Seguidamente, un resumen acerca de las principales fuentes oficiales españolas desde donde se ha extraído la información geográfica en formato ráster y vector. Por último, un recorrido breve sobre algunos metadatos relacionados con las fuentes ráster y vector utilizadas como base para el desarrollo de los procesos de caracterización de la subcuenca.

6.1. Software

La herramienta informática especializada en estructuración e implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG), utilizada aquí para el desarrollo y tratamiento cartográfico corresponde a ArcGIS versión 10.3, de propiedad de ESRI, de manera conjugada integrando sus tres (3) principales componentes: ArcCatalog, ArcMap y ArcToolbox.

Es la herramienta SIG líder en el mercado actual, y según Olaya (2011) considerada una herramienta de la casa ESRI *"pionera y líder del sector hasta el día de hoy"*. Por su parte Moreno et al. (2007) afirma que *"ArcGIS, es el resultado de una larga evolución, por lo que se trata de un sistema de cierta complejidad"*, y por tanto es considerado apropiado para implementar desarrollos SIG relacionados con los propuestos en el presente proyecto, al ofrecer *"toda una familia de productos o una arquitectura que ofrece respuestas o soluciones flexibles a las diferentes necesidades de los usuarios"*.

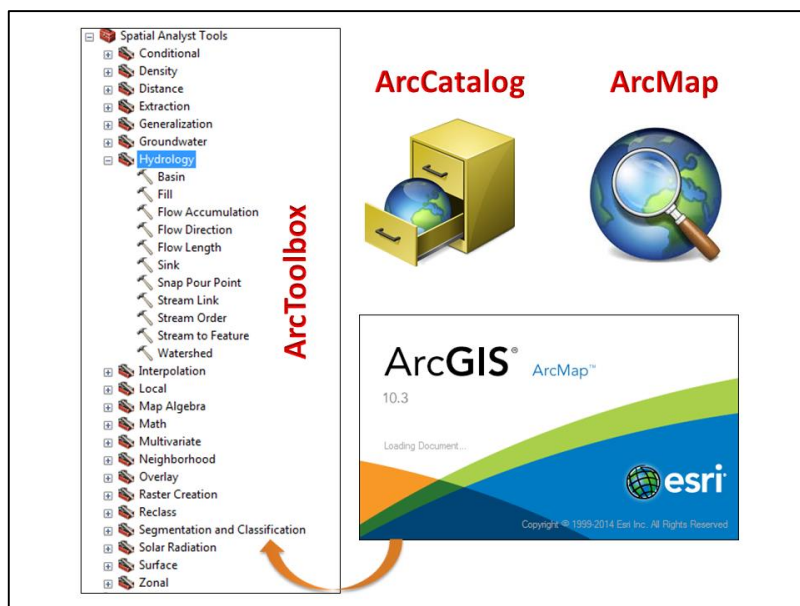


Figura 27. ArcGIS 10.3. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

- **ArcCatalog:** permite la administración y gestión de la información geográfica. Desde aquí se puede crear Bases de Datos Geográficas, shapefiles y *FeaturesClass*, y en general, todos aquellos formatos que ofrece la herramienta. Se puede explorar datos en sus componentes geográficos y alfanuméricos, crear y eliminar campos de atributos asociados, construir y asociar sistemas de referencia geográficos y proyectados, agrupar en datasets de entidades las capas y su posterior asignación de reglas topológicas, y muchos otros procedimientos asociados.
- **ArcMap:** constituye la interfaz gráfica principal del usuario desde donde puede adicionar las distintas capas vectoriales, alfanuméricas (tablas de atributos), y ráster (imágenes de sensores remotos), visualizar, realizar la edición, validación de topologías, gestión y aplicación de geoprosesamientos, configurar mapas en plantillas de salida gráfica final, etc. Las versiones recientes de ArcMap permiten integrar en esta interfaz la herramienta ArcCatalog para gestionar y administrar la información geográfica desde ArcMap. De igual manera, en ArcMap se integra el tercer gran componente de ArcGIS correspondiente a la caja de herramientas ArcToolbox.
- **ArcToolbox:** corresponde a una caja de herramientas que permiten realizar geoprosesamientos a nivel vectorial y ráster. Análisis topológicos entre datos de distintas geometrías (punto, línea, polígono), zonas de influencia, superposiciones, adiciones, sustracciones, contornos, etc. Contiene una calculadora que permite realizar operaciones entre archivos de tipo ráster.

6.2. Datos, estructuración y modelos

Los datos geográficos estarán consolidados en una Base de Datos Espacial (BDE) o Base de Datos Geográfica (BDG) que contiene información acerca de la representación de objetos organizados por capas independientes y por tipo de geometría.

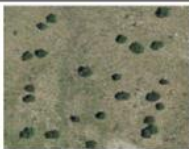
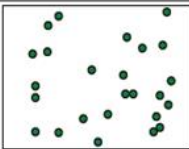




La estructura de organización de la información geográfica por capas de manera independiente, sin mezclar geometrías, es una de las características que particulariza a los SIG como tal y lo hace potente y apropiado para el análisis espacial. Dichas capas, consideradas como "*una agrupación lógica de elementos geográficos a los que también se puede hacer referencia como cobertura o tema*" (Tomlinson, 2007), organizadas por niveles, representando la realidad por medio de líneas, puntos y polígonos, deben estar almacenadas y contenidas en Bases de Datos Geográficas y en condición de asignación de un sistema de referencia espacial, tanto geográfico como proyectado.

BDE y BDG pueden hacer alusión a lo mismo, pero tienen algunos matices que las hace complementarias: de acuerdo con Bernabé & López (2012) la BDE es considerada "*una colección de datos referidos a objetos de los que se conoce su localización espacial*". No obstante, la diferencia puede centrarse en que la BDG considera información acerca de la superficie terrestre, mientras que las

BDE puede integrar cartografía que representa fenómenos que ocurren en el espacio. Sin embargo, las dos concepciones involucran información geográfica de las cuales es conocida su localización geográfica y/o espacial.

Información Geográfica (IG) extraída de distintas fuentes dispuestas en la Web sobre entornos de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE), y en representación de entidades y objetos de la realidad material, entendida una entidad como "cualquier singularidad espacial sobre cuyas características se compila información" (Bernabé & López, 2012). Por su parte Olaya (2011) denomina entidad "a un objeto o concepto del mundo real acerca del cual se recoge información, y que puede diferenciarse de otros objetos, incluso si son de su misma clase". Las entidades han de estar representadas por objetos que tienen representación física en el mundo real, y que se caracterizan por tener asociados ciertas características inherentes o atributos que definen su estado, o métodos que definen su comportamiento.

La información geográfica de carácter vectorial se estructura bajo el principio de las primitivas geométricas (puntos, líneas y polígonos).

Primitiva	Entidad espacial	Representación	Atributos																		
Puntos			<table><tr><th>ID</th><th>Altura</th><th>Diámetro Normal</th></tr><tr><td>1</td><td>17,5</td><td>35</td></tr><tr><td>2</td><td>22</td><td>45,6</td></tr><tr><td>3</td><td>15</td><td>27,2</td></tr><tr><td>4</td><td>19,7</td><td>36,1</td></tr><tr><td>.</td><td>.</td><td>.</td></tr></table>	ID	Altura	Diámetro Normal	1	17,5	35	2	22	45,6	3	15	27,2	4	19,7	36,1	.	.	.
ID	Altura	Diámetro Normal																			
1	17,5	35																			
2	22	45,6																			
3	15	27,2																			
4	19,7	36,1																			
.	.	.																			
Líneas			<table><tr><th>Ancho máx(m)</th><th>Cañado máx(m)</th><th>Longitud(km)</th></tr><tr><td>15</td><td>4,3</td><td>35</td></tr><tr><td>6,3</td><td>3,9</td><td>5,2</td></tr></table>	Ancho máx(m)	Cañado máx(m)	Longitud(km)	15	4,3	35	6,3	3,9	5,2									
Ancho máx(m)	Cañado máx(m)	Longitud(km)																			
15	4,3	35																			
6,3	3,9	5,2																			
Polígonos			<table><tr><th>Superficie(km²)</th><th>Profundidad máx(m)</th></tr><tr><td>31494</td><td>1637</td></tr></table>	Superficie(km ²)	Profundidad máx(m)	31494	1637														
Superficie(km ²)	Profundidad máx(m)																				
31494	1637																				

Olaya (2011)

Figura 28. Primitivas geométricas en el modelo de representación vectorial y ejemplos particulares de cada una de ellas con atributos asociados.

Posibilitan la integración de otros tipos de formato o modelos de datos como son los ráster. Ráster y Vector constituyen los dos (2) tipos de datos principales y fundamentales en la estructuración de BDG e implementación de SIG.

Ordoñez & Martínez (2003) afirman que "se utilizan dos métodos para representar la realidad, que dan lugar a otros tantos tipos de modelos de datos geográficos: el modelo vectorial y el modelo ráster", los dos presentan particularidades distintas, su tratamiento puede representar procesos complejos en niveles distintos, sin embargo su combinación favorece la ampliación del análisis espacial.

Los modelos vectoriales representan la realidad con geometrías específicas y características discretas de los objetos generando fronteras que se aproximan a líneas delimitadas por puntos de los cuales se conocen sus posiciones absoluta y relativa. Ordoñez & Martínez (2003) afirma que *“en el modelo vectorial de datos se registran únicamente las fronteras de los objetos espaciales”*, mientras que Peña (2006) considera que este modelo divide la realidad *“en una serie de objetos discretos (puntos, líneas, polígonos) a los que se puede asignar diversas propiedades, cualitativas o cuantitativas”*. Por su parte, Moreno et al. (2007) define el modelo vectorial *“por usar las figuras de la geometría convencional, puntos, líneas, curvas, polígonos, círculos, elipses o volúmenes para representar las entidades del mundo real”*, introduciendo otras geometrías derivadas de las primitivas.

El modelo ráster es otra manera de representar cartográficamente un fenómeno geográfico y/o espacial, registrando variables en celdas o píxeles en el continuo. De acuerdo con Ordoñez & Martínez (2003) *“en el modelo ráster, lo que se registran no son las fronteras de los objetos espaciales sino su contenido”*. Esto hace que los dos tipos de formato de datos sean bastante complementarios e introduzcan al análisis SIG propiedades que amplían el conocimiento de cierto fenómeno.

Un contraste que ilustra gráficamente el formato vectorial y ráster, se muestra a continuación:

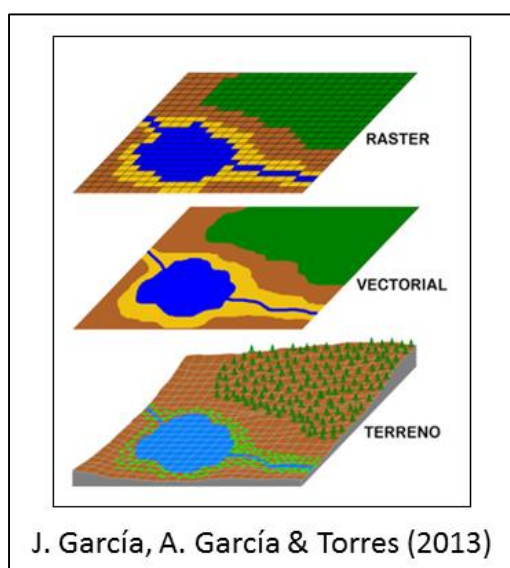


Figura 29. Modelos de datos geográficos.

La concepción de modelo se ha usado aquí para hacer alusión al tipo de formato de representación de la información geográfica, sin embargo, en un capítulo posterior se utilizará para referirse, de manera más amplia, a un modelo de almacenamiento en una BDG que contiene relaciones entre los objetos y que se encuentra asociado a cada registro espacial una tabla de atributos alfanumérica.

De manera complementaria, Olaya (2011) afirma que la dimensión de los datos geográficos está representada de la siguiente manera:

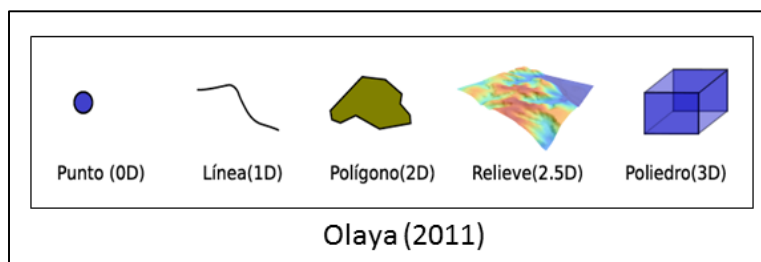


Figura 30. Dimensión de los datos geográficos.

Capas de tipo ráster que representan el relieve mediante un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) son la base principal para el análisis hidrológico, es considerado por Olaya (2011) como un elemento geográfico de dimensión 2.5D ya que la componente Z asociada a cada pixel o celda “*no es realmente equivalente a utilizar una componente espacial tridimensional, ya que no permite recoger en un mismo punto distintos valores*”

Asociada a cada tipo de dato geográfico, en uno u otro formato de representación gráfica, existen algunas características o componentes inherentes al objeto que de acuerdo con Olaya (2011), son: “*componente espacial, componente temática, componente numérica y componente alfanumérica*”.

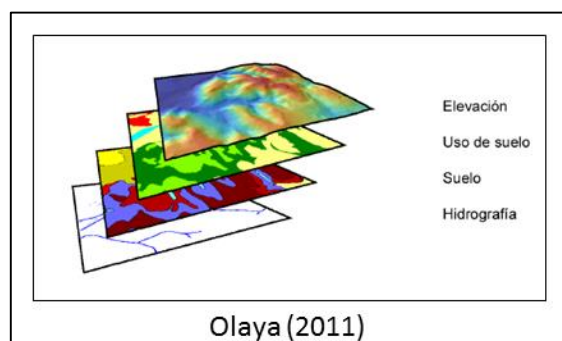


Figura 31. Concepto de capa de información geográfica dentro de un SIG.

6.3. Fuentes principales de información

Desde el portal de acceso a la información geográfica de España, se conectan y entrelazan las distintas fuentes de datos vía Web, necesarios y requeridos para el desarrollo de los procesos de caracterización de la subcuenca del río Adaja, desde contextos Estatales, Autonómicos y/o Locales.

Desde la Infraestructura de Datos Espaciales de España (IDEE), es posible acceder a toda la información geográfica requerida para cumplir los objetivos propuestos, de manera organizada y estandarizada. Por consiguiente, la geoinformación que ha de integrarse a la Base de Datos Geográfica (BDG) central, ha sido consultada y descargada previamente de los Servicios Web de tipo WMS y WFS. Los dos servicios permiten el acceso en la Web a la información geográfica, solo que el de tipo WFS, además de permitir visualizar geodatos, permite descargarlos en formatos vectoriales y ráster, principalmente.

El éxito geográfico de los países prima el desarrollo de una Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) interoperable, abierta, estandarizada y fácil de usar. Para poner en contexto, *"esta infraestructura no es más que el conjunto de recursos cartográficos disponibles en la red, sobre la que los datos mismos serán más útiles al formar parte de un todo más completo"* (Bernabé & López, 2012). Por su parte J. García, A. García & Torres (2013) reconocen una característica importante de las IDE que se corresponde con el permitir *"hacer uso de un mínimo conjunto de estándares, protocolos y especificaciones"*.

Otra característica importante que, de acuerdo con Bernabé & López (2012) y considerando uno de los valores agregados principales de estas herramientas Web, es conseguir que usuarios, tanto expertos como no expertos, puedan hacer uso de ellas y tener acceso a la información geográfica para su posterior análisis, no sin antes mencionar la importancia de la interoperabilidad concebida como *"la idea de aplicar la filosofía de los sistemas abiertos a los SIG"* (Bernabé & López, 2012), y desde un contexto más amplio y completo, concebida como la facilidad para el intercambio, transporte e interpretación de la información geográfica en general.

A continuación se relacionan las fuentes principales desde donde se ha extraído la información geográfica desde la Web, de los diferentes portales oficiales españoles, dispuestos especialmente para obtener los datos originales en formatos vectoriales y ráster.

Los datos geográficos (ráster y vector) de interés han sido extraídos básicamente desde el Centro de Descargas del CNIG, la IDECyL, el portal Web de descargas del MAGRAMA, en lo que respecta a la cartografía de la actividad de aguas, el SIA adscrito al MAGRAMA, el Instituto Geológico y Minero de España y la Confederación Hidrográfica del Duero.

6.3.1. Instituto Geográfico Nacional (IGN). Centro de descargas del CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica).



Figura 32. Portal Web del Centro de Descargas del IGN. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

De este lugar virtual se han obtenido los siguientes insumos: Ortofoto PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) Máxima Actualidad; Mapa Topográfico Nacional escala 1:25.000 (MTN25 ráster); Modelo Digital de Terreno (MDT) que almacena datos de elevación en cada celda (MDE); Cartografía de ocupación del suelo de España: Sistema de Ocupación del Suelo de España (SIOSE), escala 1:25.000, vigencia 2011.

6.3.2. Junta de Castilla y León. Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León (IDECyL). Servicio de descargas.

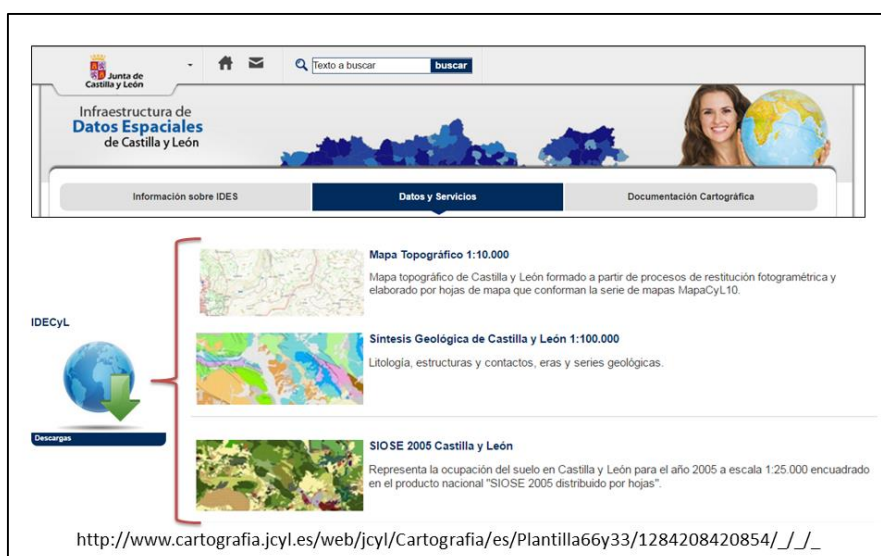


Figura 33. Portal Web del Centro de descargas de la IDE de Castilla y León. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Esta plataforma de carácter Autonómico provee insumos cartográficos de la Comunidad Autónoma de Castilla y León. De aquí se han obtenido insumos tales como: Mapa topográfico en formato vectorial escala 1:10.000; Cartografía de Ocupación del Suelo de Castilla y León escala 1:25.000, enmarcado dentro del sistema SIOSE, los directorios de los Servicios Web de la Junta de Castilla y León, así como los respectivos modelos de datos para la estructuración de los geodatos en la Base de Datos Geográfica, según la escala de trabajo.

6.3.3. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA). Cartografía y SIG. Descargas del área de actividad del agua.



Figura 34. Portal Web Cartografía y SIG del MAGRAMA. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

6.3.4. Sistema Integrado de Información del Agua (SIA). Descargas.



Figura 35. Portal Web de descargas de información geográfica del SIA.

6.3.5. Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Cartografía geocientífica.



Figura 36. Portal Web de descargas de información geográfica del IGME.

6.3.6. Confederación Hidrográfica del Duero (CHD).



Figura 37. Portal Web de la Confederación Hidrográfica del Duero.

Las capas de información geográfica con las temáticas a integrar en la Base de Datos Geográfica, así como las características generales de cada una de ellas, se especifican con detalle en el siguiente capítulo.



Figura 38. Portales Web de las principales fuentes de descarga de información geográfica. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

6.4. Fuentes ráster base

Con el propósito de exponer las características principales de los insumos cartográficos básicos en formato ráster, que han de ser útiles en el logro de los objetivos, a continuación se detallan algunos aspectos acerca de los tres (3) insumos básicos escogidos y seleccionados como apoyo a los procesos de caracterización de la subcuenca del río Adaja: Las imágenes digitales del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de 0,5 metros de resolución espacial; El Mapa Topográfico Nacional escala 1:25.000; y el Modelo Digital de Terreno (MDT) de 5, 25 y 200 metros de resolución espacial.

6.4.1. Modelo Digital de Terreno (MDT) – Modelo Digital de Elevación (MDE)

En materia de caracterización hidrográfica superficial, y en general para aplicaciones en temas medioambientales, el MDT/MDE es uno de los insumos más importantes porque la representación cartográfica en principio se desarrolla sobre fenómenos que ocurren en la superficie terrestre y están directamente relacionados con la orografía del terreno, por lo que una de las cosas principales que hay que plantearse es el conocimiento detallado de las bases de cualquier sistema.

Es por ello, que en el presente trabajo se ha prestado especial importancia en el tratamiento de la información ráster, en especial, el MDE, para la derivación de varios productos con el propósito de caracterizar los principales rasgos orográficos de la subcuenca, por lo que *"el MDE es una capa de información fundamental, y de él pueden extraerse un número muy elevado de nuevos parámetros"* (Olaya, 2011).

Es la forma del terreno la que determina el movimiento del agua, y la mejor manera de representar cartográficamente las geoformas superficiales es utilizando una cuadrícula regular con óptimas resoluciones espaciales. De acuerdo con Olaya (2011) *"el MDE es una herramienta de primer orden para un análisis exhaustivo de los fenómenos hidrológicos"*, por lo que gran parte de los resultados y productos se han enfocado en la extracción de características topográficas del terreno tales como mapa de pendientes, dirección y acumulación de flujo, mapa de sombreado, extracción de la red de drenaje para determinar su jerarquía, cuencas de drenaje, etc.

Otro producto extraído del MDE es la delimitación final de la subcuenca, y la comparación de los límites obtenidos a partir de MDE de distintas resoluciones espaciales.

De los repositorios oficiales Web mencionados anteriormente, se procede a la descarga de los siguientes MDT:



Figura 39. Catálogo de productos MDT del CNIG. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Como se ha mencionado antes, se decide utilizar los MDT de 5, 25 y 200 metros de resolución espacial (tamaño de píxel) con el propósito de analizar los resultados en la delimitación de la zona de interés: subcuenca del río Adaja.

Junto a estos tres referentes, se integra la demarcación hidrográfica realizada por el MAGRAMA con base a un MDT de 100 metros de resolución espacial. Adicionalmente, la Confederación Hidrográfica del Duero menciona otro referente superficial, que se tendrá en cuenta para comparar los distintos resultados obtenidos. Teniendo en cuenta esto, en el capítulo siguiente, apartado de delimitación de la zona de estudio, se comparan los cinco referentes. Posteriormente, se elegirá el criterio que determinará la delimitación final de la subcuenca. Para ello se procura utilizar criterios objetivos bajo algoritmos programados previamente por el módulo de soluciones hidrológicas de ArcGIS.

Dichos criterios han de responder a una delimitación de subcuenca topográfica, lo que descarta tener presente cualquier otro criterio de tipo político administrativo y/o de gestión. Se descarta porque la dinámica del agua, y con ella los conocimientos que se logren en cuanto al flujo de la misma al interior de la subcuenca, dependen estrictamente de la forma del relieve y de los factores climáticos asociados básicamente a las precipitaciones. Luego, es el organismo de gestión quien debe seguir siempre los criterios de límite que dicta la realidad superficial del agua, para lograr proyectar una buena gestión del agua en materia de Planificación Hidrológica.

Si los límites físicos de acción de las políticas y normas derivadas de dichos instrumentos de planificación y/o ordenación, con propósitos de uso, consumo, demanda y retorno de agua, no responden a una realidad física y/o topográfica,

no es posible estimar bien la dinámica del sistema que consiste básicamente en: ¿Que agua hay?; ¿Con cuánta agua se dispone para el aprovechamiento humano?; ¿Cuánto escurre?; ¿En cuánto puede y debe proyectarse una capacidad de embalse?; ¿Cuánto sale?; ¿Cuánto vuelve y retorna en el tiempo?; ¿Cuánto tiempo se requiere dejar descansar el sistema para que el agua retorne de manera natural y vuelva a ser útil y suficiente?, etc.

El MDT que se usa como referencia, luego de definir la delimitación de la subcuenca, es el que corresponde al MDT de 5 metros de resolución espacial, obtenido con tecnología radar de tipo LiDAR, del cual se extraen las características orográficas principales de la zona de interés.

La selección y descarga de estos insumos para la zona estudio, corresponden al cubrimiento de 36 hojas (0370, 0371, 0372, 0373, 0398, 0399, 0400, 0401, 0426, 0427, 0428, 0429, 0453, 0454, 0455, 0456, 0457, 0479, 0480, 0481, 0482, 0483, 0504, 0505, 0506, 0507, 0508, 0529, 0530, 0531, 0532, 0533, 0554, 0555, 0556, 0557) de la cuadrícula descrita por el Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000, como unidad de distribución y descarga.

Para efectos de la delimitación de la subcuenca, se ha elegido un margen de 36 hojas, con el propósito de ampliar el grado de libertad en la aplicación automática de los algoritmos implementados por el programa para este fin. Posteriormente, los insumos ráster considerados para los 36 cubrimientos se reducirán a razón del perímetro definido.

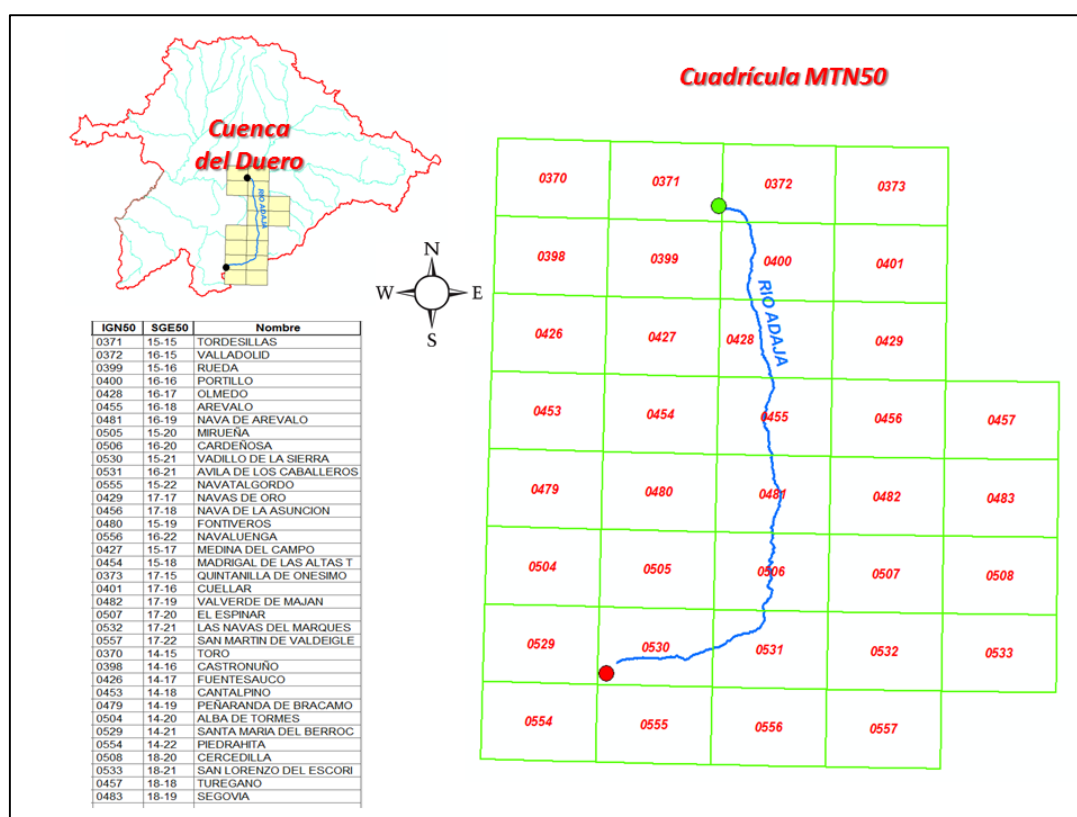


Figura 40. Cuadrícula del MTN50 con cubrimiento de la zona de estudio.
Adaptación: Ray Lesmar. Fuente: CNIG.

En procesos metodológicos posteriores habrá que realizar la consolidación de los distintos ficheros ráster con el propósito de unificarlos y procesarlos en conjunto.

A continuación se muestran las hojas del MTN50 correspondientes para tener un cubrimiento suficiente en la extracción de productos derivados de toda la subcuenca del río Adaja.

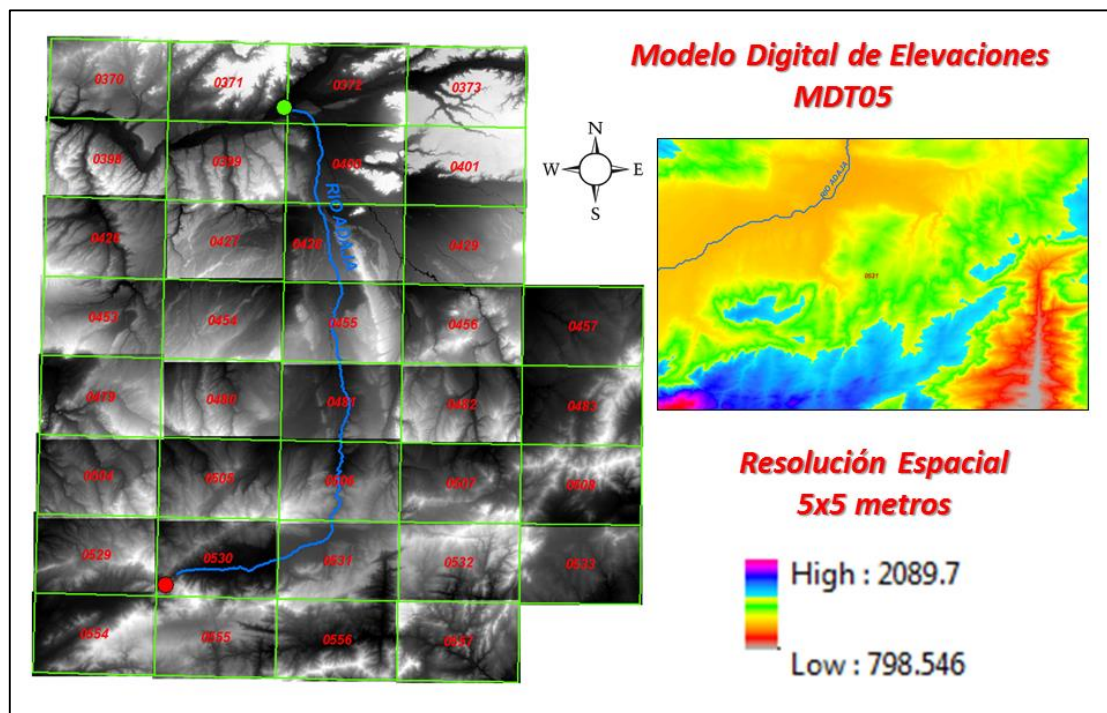


Figura 41. Modelo Digital de Elevaciones MDT05. Adaptación: Ray Lesmar.
Fuente: CNIG.

6.4.2. Ortofotografía Aérea del PNOA

El recurso del PNOA es un buen referente, pero, a pesar de que muestra un modelo de la realidad superficial en verdadero color, no es más que un plano si se observa de perfil, luego la esencia de la mejor representación de la realidad la introduce el MDE al asignar una aparente dimensión 3D, que según Olaya (2011) es una dimensión 2,5 D.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS DEL CNIG

► PNOA MÁXIMA ACTUALIDAD:



Mosaicos de ortofotos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) más recientes disponibles, en formato ECW, sistema geodésico de referencia ETRS89 y proyección UTM en su huso correspondiente. La unidad de distribución y descarga es la hoja del MTN50 (Mapa Topográfico Nacional 1:50.000), resultado de componer un mosaico con las ortofotos correspondientes a cada hoja del MTN50. Un mosaico de Máxima Actualidad por hoja MTN50 se forma seleccionando de entre toda la información de ortofotografía PNOA disponible, aquella que tenga una fecha de referencia más reciente, y en caso de coincidencia, se seleccionará la que tenga un tamaño de píxel menor. Cada mosaico va acompañado de un archivo de metadatos (XML) y un archivo shape (comprimido en formato ZIP) formado por recintos que indican, para cada píxel del mosaico, la resolución geométrica y la fecha de toma de la ortofotografía.

[Descargar](#) [Gráfico con fechas de vuelo](#)

<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do#selectedSerie>

Figura 42. Catálogo de productos PNOA del CNIG.

Este tipo de insumos son la fuente principal para la generación de la cartografía base en formato vectorial, ya sea por procedimientos de captura asistida y supervisada por un operador mediante procesos de restitución cartográfica, o la extracción automática de información a partir de los datos almacenados en las celdas o píxeles. De acuerdo con Bernabé & López (2012) la extracción de información vectorial puede realizarse de manera manual o automática: *“el método manual se conoce como digitalización. El método automático se denomina vectorización”*.

El presente trabajo implementa procesos de vectorización como la extracción de áreas y perímetros derivados del procesamiento del MDT, entre otros.

Aunque el presente trabajo no tiene como objetivo principal la generación cartográfica base, sino la producción de insumos derivados a partir de datos ráster, principalmente, las imágenes del PNOA pueden ser de utilidad en la identificación de los puntos de control para la aplicación de criterios en la estimación de las redes de drenaje principal de la subcuenca, así como su posterior jerarquía.

Para cualquier otro análisis de alcance visual, este insumo puede ser muy útil en el análisis hidrológico, aprovechando la buena resolución espacial y con ello el alto nivel de detalle que se puede apreciar en la misma.

Toda la cartografía vectorial base topográfica, infraestructura vial, hídrica, etc., que se usará como apoyo en la caracterización física superficial de la subcuenca del río Adaja, ha sido adquirida y estructurada previamente a partir de los insumos de imagen del proyecto PNOA, por lo que se convierte en un insumo importante en los análisis de validación de las consistencias posicionales y temáticas de dichas cartografías.

Por esta y muchas otras razones, se ha elegido integrar este insumo en la Base de Datos Geográfica del proyecto.

La vigencia de las imágenes que se integran ahora, datan del año 2014, no obstante y, según la dinámica de producción del proyecto PNOA, existe actualmente cubrimiento con vigencia 2016, correspondiente a las siguientes hojas del MTN50:

Los mosaicos actualizados (1:50.000) son:

“0437, 0438, 0439, 0440, 0441, 0465, 0466, 0467, 0468, 0469, 0492, 0493, 0494, 0495, 0517, 0518, 0519, 0542, 0543, 0544, 0545, 0566, 0567, 0568, 0569, 0570, 0590, 0591, 0592, 0613, 0614, 0615, 0639”. (PNOA, 2016)

Lo anterior indica claramente que ninguna de las 36 hojas que cubren total o parcialmente alguna porción de la zona de interés presenta vigencia 2016, por lo que todo el referente PNOA recopilado fue elaborado hace dos años.

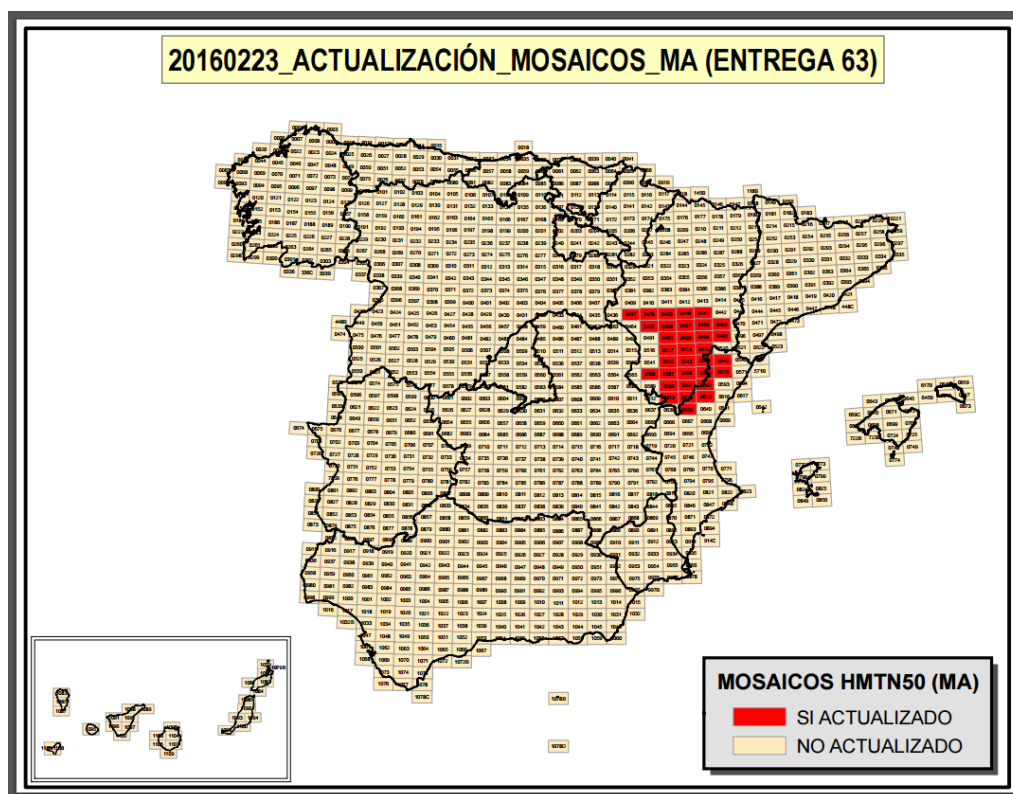


Figura 43. Actualización PNOA. Fuente PNOA (2016).

Más adelante se precisan algunos detalles acerca de la cartografía base vectorial a utilizar en el presente trabajo, no obstante, la fuente y la última vigencia de las mismas da fe de su alta fidelidad, pese a varias coberturas del suelo por ejemplo, puedan llegar a tener bastante variabilidad en el transcurso de dos periodos anuales.

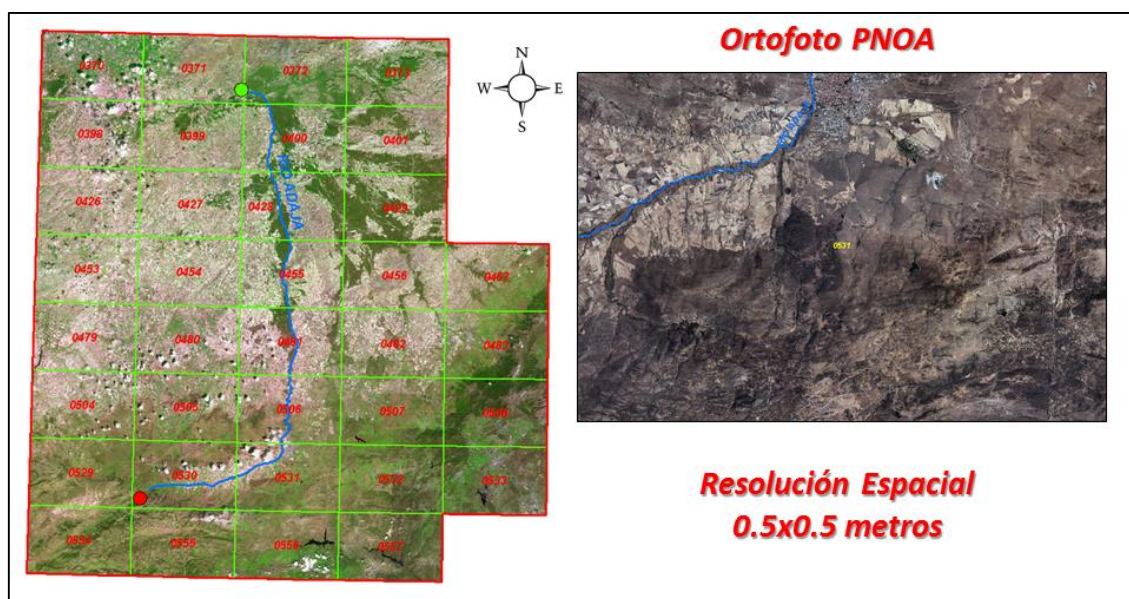


Figura 44. Ortofotografía PNOA. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente PNOA (2016).

6.4.3. Mapa Topográfico Nacional

Se obtiene la cobertura completa para las 36 zonas, con el Mapa Topográfico Nacional escala 1:25.000 (MTN25) en formato ráster. Este insumo se integra a los productos finales del proyecto.

Para caracterizaciones y análisis hidrológico este insumo puede servir de base para localizar ciertos puntos de interés en la superficie ya que contiene un nutrido abanico de topónimos.

Además, se incluye como apoyo a procesos de definición automática de drenajes (mediante criterios que se describen más adelante) en la localización de puntos de nacedero de arroyos y/o ríos como elección de puntos de control en la muestra que ha de elegirse como punto de partida que hay que especificarle al software, con el propósito de que identifique puntos a partir de los cuales el agua escurrirá, por un canal de arroyo o río, en dirección "aguas abajo".

Estas, entre muchas otras aplicaciones, pueden derivarse de este insumo cartográfico, por tal motivo se ha elegido integrar en la Base de Datos Geográfica del SIG.



Figura 45. Catálogo del MTN25 ráster del CNIG.

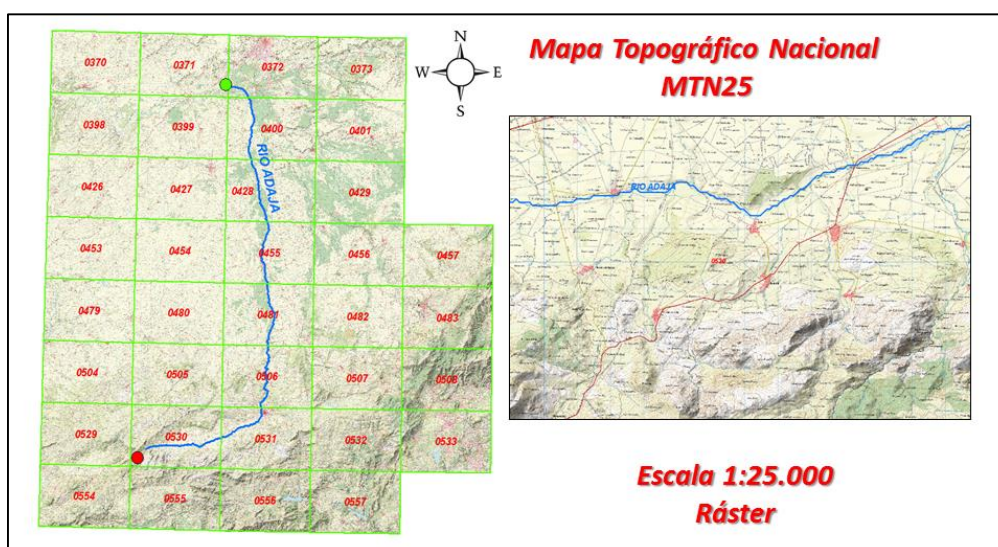



Figura 46. Mapa Topográfico Nacional Ráster escala 1:25.000. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: CNIG.


6.4.4. Cartografía Geológica de España (Fuente: IGME - CHD)

Una de las fuentes geológicas consultadas para integrar como ficheros ráster en la caracterización física de la subcuenca es la cartografía geológica MAGNA50 del IGME a escala 1:50.000. Ella se encuentra disponible en la Web siguiendo la cuadrícula de las hojas del MTN50, y se almacenan en formato de imagen simple georreferenciada. Junto con la cartografía de interés climático, este referente se incluye como ráster, constituyendo procesos de vectorización para desarrollos futuros.




Instituto Geológico y Minero de España

Cartografía Geológica



MAGNA 50 - Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (2ª Serie)

El Mapa Geológico Nacional (MAGNA), realizado entre 1972 y 2003 por el Instituto Geológico y Minero de España se distribuye en hojas 1:50.000 (1:25.000 en los casos particulares de Canarias, Ibiza-Formentera, Menorca, Ceuta y Melilla). En el Mapa Geológico se representa la naturaleza de los materiales (rocas y sedimentos) que aparecen en la superficie terrestre, su distribución espacial y las relaciones geométricas entre las diferentes unidades cartográficas.



GEODE - Cartografía geológica digital continua a escala 1:50.000

Este mapa representa el resultado de la homogeneización cartográfica de la serie del mapa geológico MAGNA (Cartografía geológica nacional a escala 1:50.000). Serie que integra 1143 mapas. Como consecuencia del dilatado proceso que ha supuesto la ejecución histórica de esta serie, se advierten diferencias entre sus fases iniciales y finales, en cuanto a criterios de asignación de unidades geológicas, nivel de detalle, continuidad de las unidades y estructuras geológicas en los bordes de hojas, codificación y simbologías.

IGME (2016)

<http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50.aspx?language=es>

Figura 47. *Cartografía Geológica ráster del IGME. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: IGME.*

Para complementar el aspecto geológico de la subcuenca, se ha extraído el mapa geológico de la cuenca del Duero, elaborado por la CHD, disponible en el Atlas de mapas del Plan Hidrológico vigente.

Al igual que la cartografía geológica del IGME, este mapa geológico de la cuenca del Duero, requiere desarrollos futuros de vectorización, estructuración y adecuación topológica, con el propósito de integrar a la BDG general una temática útil en la extracción de productos derivados mediante la implementación de SIG.

En la siguiente figura se menciona, a parte de estos, otros referentes geológicos a escalas menores como lo son el Mapa Geotécnico de Ordenación Territorial y Urbana 1:100.000, y el Mapa Hidrogeológico de España a 1:200.000. No obstante lo anterior, por motivo de detalle y disposición completa de información para la zona de interés, se ha elegido incorporar el MAGNA50 y el que dispone la CHD.



Figura 48. Cartografía Geológica. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.
Fuente: IGME y CHD.

6.4.5. Cartografía Climática de España (Fuente: CHD – MAGRAMA - AEMET)

Otro aspecto importante son los de carácter climático. Como se ha mencionado anteriormente, este referente ha sido extraído e incorporado como ráster, constituyendo procesos de vectorización, estructuración y adecuación topológica como desarrollos futuros.

La cartografía en formato ráster ha sido extraída del MAGRAMA y desarrollada con base a series temporales que datan desde 1940 hasta el 2006, a través del modelo SIMPA.

La cartografía se dispone en la Web a escala 1:1.000.000 con cubrimiento completo para España, presentando en varios casos, poca variabilidad para la escala que representa la porción de la subcuenca del río Adaja. No obstante, constituye un buen referente de caracterización climática porque permite visualizar el detalle de las variaciones en cuanto a asuntos relacionados con las precipitaciones medias anuales, temperaturas, medias anuales, evapotranspiración real y potencial, entre otros.

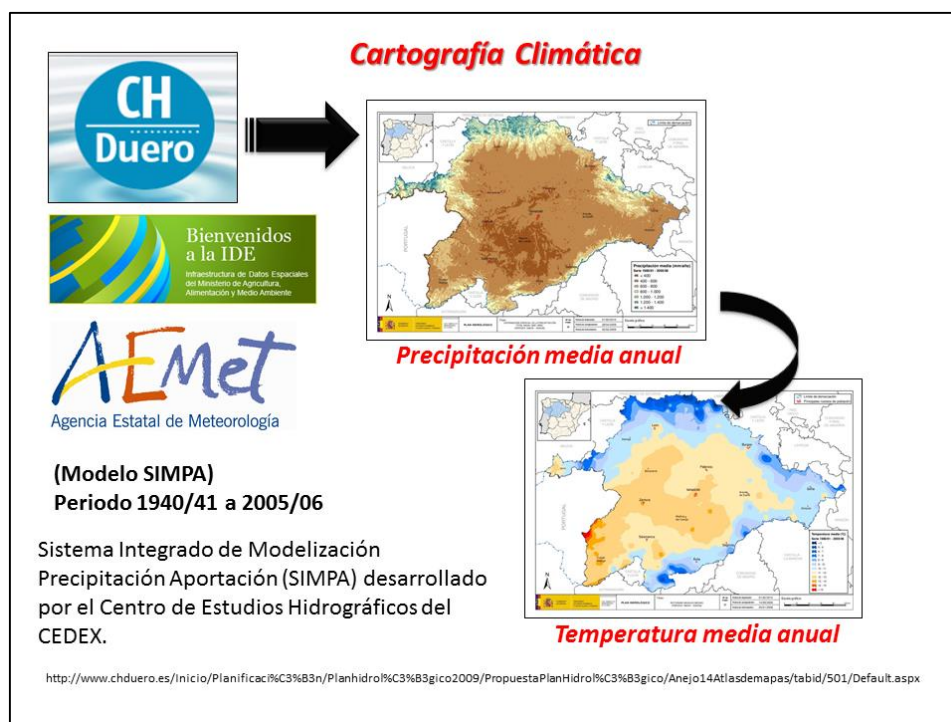


Figura 49. Cartografía Climática. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: MAGRAMA y AEMET.

6.5. Fuentes vectoriales base

La cartografía vectorial que se integra en la BDG del proyecto proviene, en su mayoría, de las bases topográficas disponibles en la Web por la IDE de Castilla y León, a escala 1:10.000, que incluye temáticas tales como hidrografía, curvas de nivel, red de transporte, edificaciones y construcciones, toponimia, etc.

La ocupación del suelo se integra como información vectorial a escala 1:25.000, y ha sido extraída del Centro de Descargas del CNIG. La IDECyL ofrece la descarga de este insumo enmarcado dentro del proyecto SIOSE del año 2005, no obstante el IGN ofrece un referente SIOSE del año 2011.

Básicamente, estos son los dos referentes vectoriales integrados al proyecto, donde cabe insistir que, como desarrollos futuros, esta cartografía debe ser objeto de revisiones minuciosas en aspectos tales como estructuración y adecuación topológica.

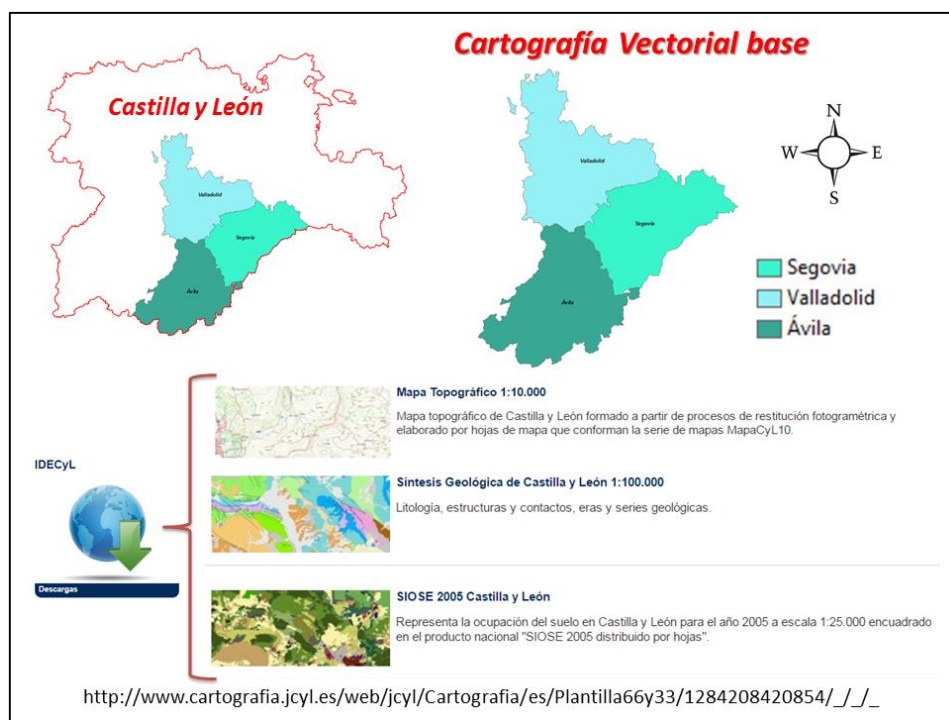


Figura 50. Cartografía vectorial base. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: IDECyL.

6.5.1. Mapa Topográfico de Castilla y León (Fuente: IDECyL)

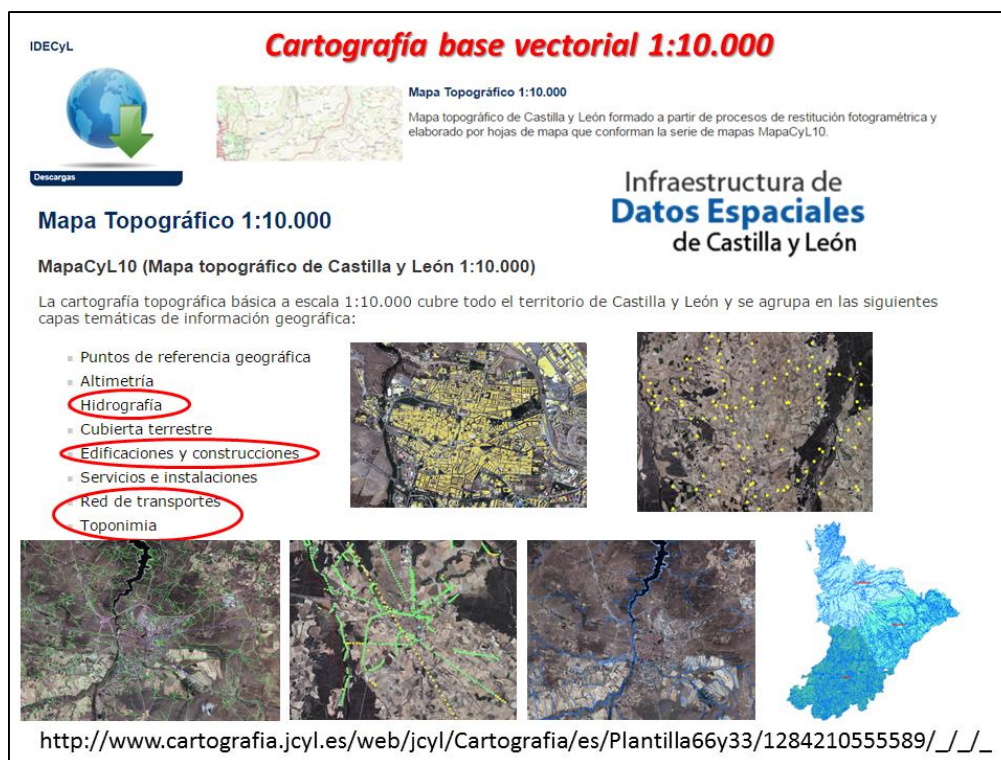


Figura 51. Cartografía Base vectorial escala 1:10.000. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: IDECyL.

6.5.2. Ocupación del Suelo en Castilla y León (Fuente: IDECyL)

Los referentes de ocupación del suelo SIOSE y CORINE se han referenciado como opciones para la integración y consolidación de la ocupación del suelo de la subcuenca del río Adaja, sin embargo se ha tomado como referente principal el SIOSE vigencia 2011. El referente CORINE podría plantearse como revisión en desarrollos futuros.

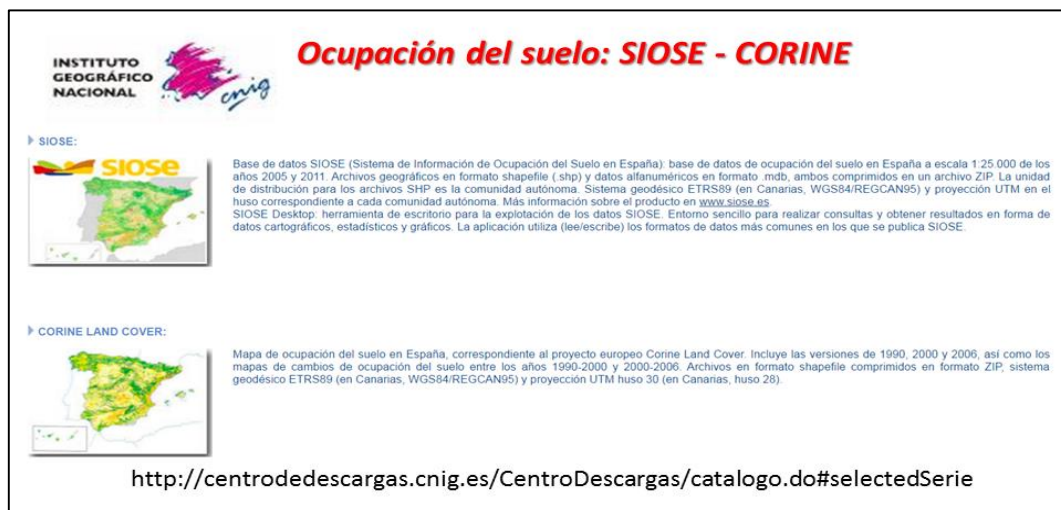


Figura 52. Ocupación del Suelo SIOSE - CORINE. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: CNIG.



Figura 53. Cartografía de Ocupación del Suelo escala 1:25.000. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: IDECyL.

7. METODOLOGÍA

El presente capítulo contiene la descripción detallada de los procedimientos propuestos y ejecutados en la configuración de los productos que permitirán la caracterización superficial de la subcuenta del río Adaja.

En principio, como se ha mencionado antes, se presta especial atención al tratamiento y procesamiento de la cartografía ráster, en especial a los productos derivados del MDE. Con base a ello, se inicia con la delimitación de la subcuenca a partir de los MDE de 05, 25 y 200 metros de resolución espacial. Para llegar a ello, primero ha de realizarse la unificación de los ficheros, el cálculo de estadísticas, el cálculo de pirámides (en casos con altos volúmenes de información para agilizar procesos de visualización), la construcción del fichero preliminar de dirección de flujo, su posterior corrección mediante la eliminación de sumideros y, finalmente, el cálculo del mapa de dirección de flujo corregido.

Se procede con la construcción del fichero de acumulación de flujo, la identificación del punto de confluencia, y la posterior validación con el algoritmo del software para la delimitación de la cuenca de drenaje o subcuenca topográfica del río Adaja. Este procedimiento se repite para todos los ficheros de resoluciones variadas y, finalmente, se comparan y analizan los resultados, eligiendo la delimitación final.

Seguidamente, se especifican los procedimientos para la generación de los productos ráster derivados del MDE tales como el mapa de pendientes, el mapa de sombreado, mapa de orientaciones, las cuencas vertientes, la extracción de redes de drenaje y su posterior cálculo de jerarquías.

Una vez definido el perímetro final, se procede a identificar los productos finales y la selección de temáticas a incluir (como referentes principales en la caracterización física superficial de la subcuenca).

Luego, se realiza un breve recorrido acerca de características inherentes a la información geográfica tales como los rangos de escala y sistemas de referencia geográfico y proyectado utilizados; la descripción de las escalas de trabajo; la definición de la estructura de la base de datos geográfica y el modelo de datos donde se describe el modelo de datos relacional; la definición de las propiedades espaciales de los datos en el que se identifica las propiedades topológicas más importantes en la estructuración de la BDG, mencionando una vez más, que gran parte de dichos procesos se encuentran enmarcados como desarrollos futuros y, finalmente, el diseño y gestión de la base de datos geográfica que muestra cómo se organizan las capas el interior de la GDB mediante datasets de entidades.

La consecución de los logros propuestos como objetivo general y, en especial el logro del objetivo específico número 1 propuesto en el presente trabajo, demandan una serie de procedimientos técnicos, lógicos, secuenciales y estructurados, resumidos básicamente por los siguientes pasos:

- Delimitación de la zona de estudio.
- Generación de productos ráster derivados del MDE.
- Productos finales y selección de las capas temáticas.
- Rangos de escala y sistemas de referencia.
- Definición de la estructura de la base de datos geográfica y el modelo.
- Definición de las propiedades espaciales de los datos.
- Diseño y gestión de la base de datos geográfica.

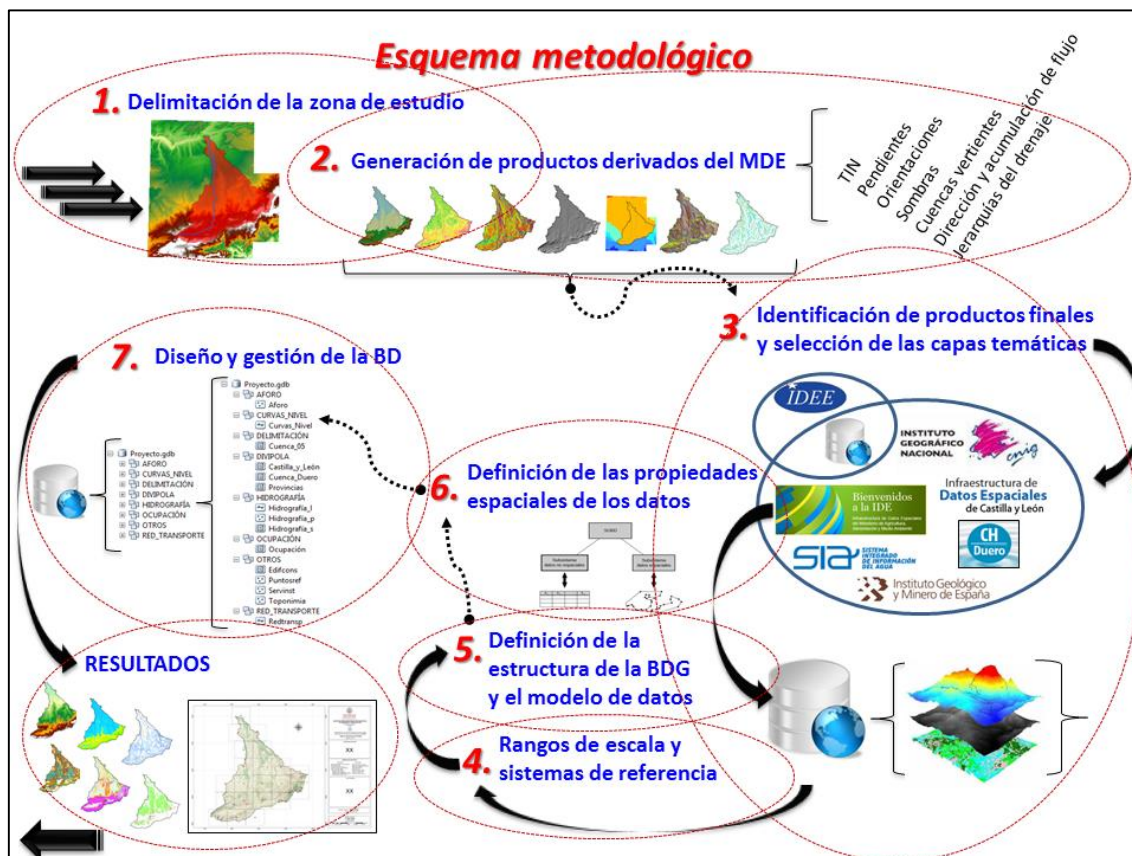


Figura 54. Esquema metodológico. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

A continuación, se realiza el desarrollo de cada una de ellas de manera detallada:

7.1. Delimitación de la zona de estudio

Con base a tres (3) insumos de tipo MDE de 5, 25 y 200 metros de resolución espacial, se construyen mapas de dirección de flujo para analizar hacia donde escurre el agua de la subcuenca, especificando previamente un punto de aforo o de confluencia, desde donde saldrá todo el flujo hacia otros afluentes, de mayor envergadura, definiendo posteriormente la delimitación de las fronteras de la subcuenca y su respectiva línea divisoria que las separa de otras subcuencas adyacentes.

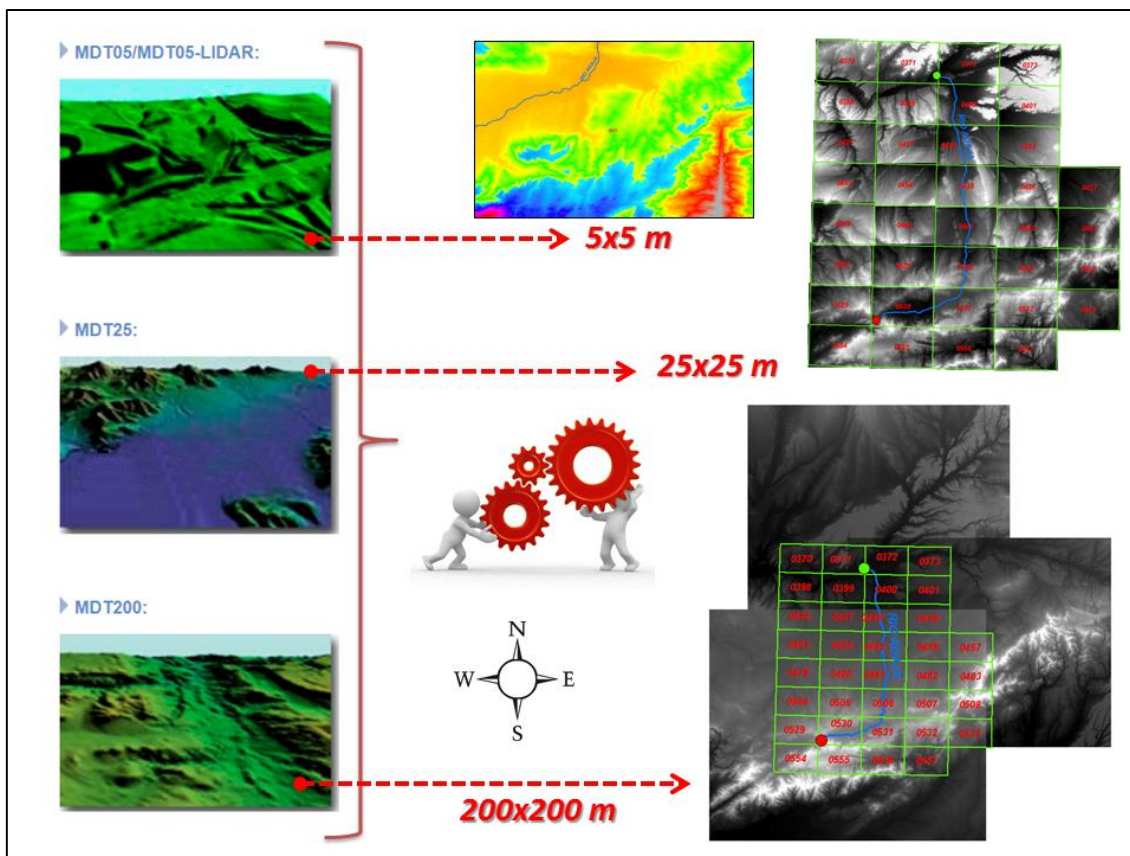


Figura 55. MDT de 5, 25 y 200 metros de resolución espacial. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: CNIG.

7.1.1. Unificación de los ficheros ráster

Para ello se compone cada uno en un único dataset ráster, uniendo todos los fragmentos en un solo fichero. Este paso es conveniente ya que los MDT se encuentran fraccionados según la cuadrícula base.

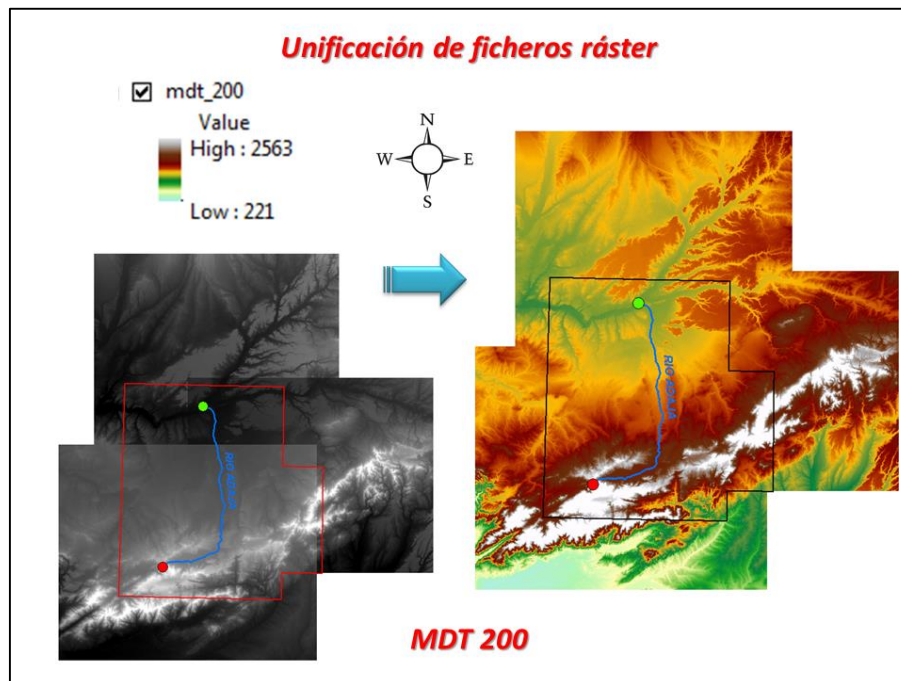


Figura 56. Unificación de ficheros ráster de MDT 200. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: CNIG.

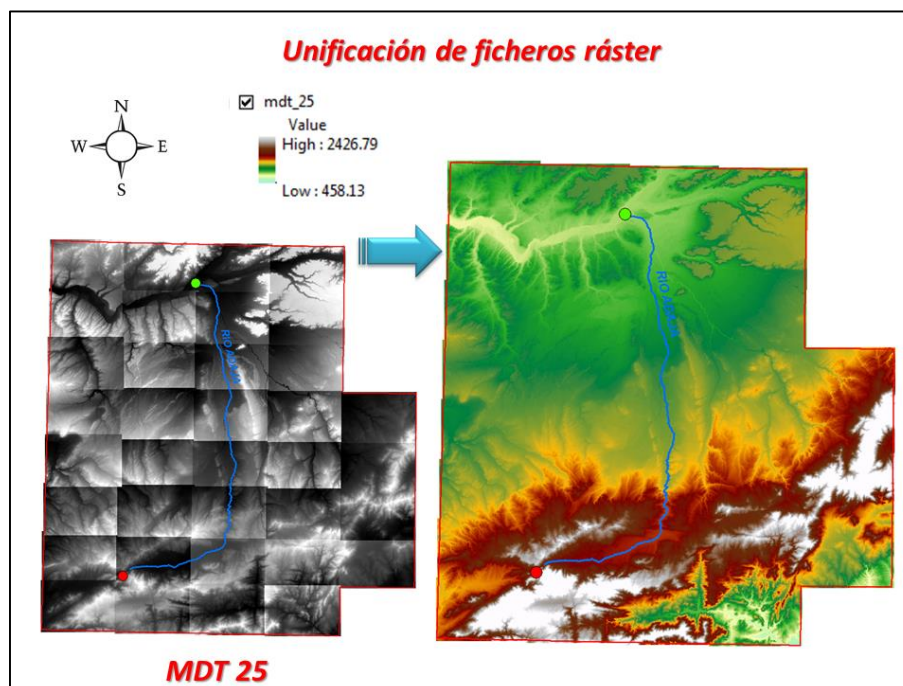


Figura 57. Unificación de ficheros ráster de MDT 25. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: CNIG.

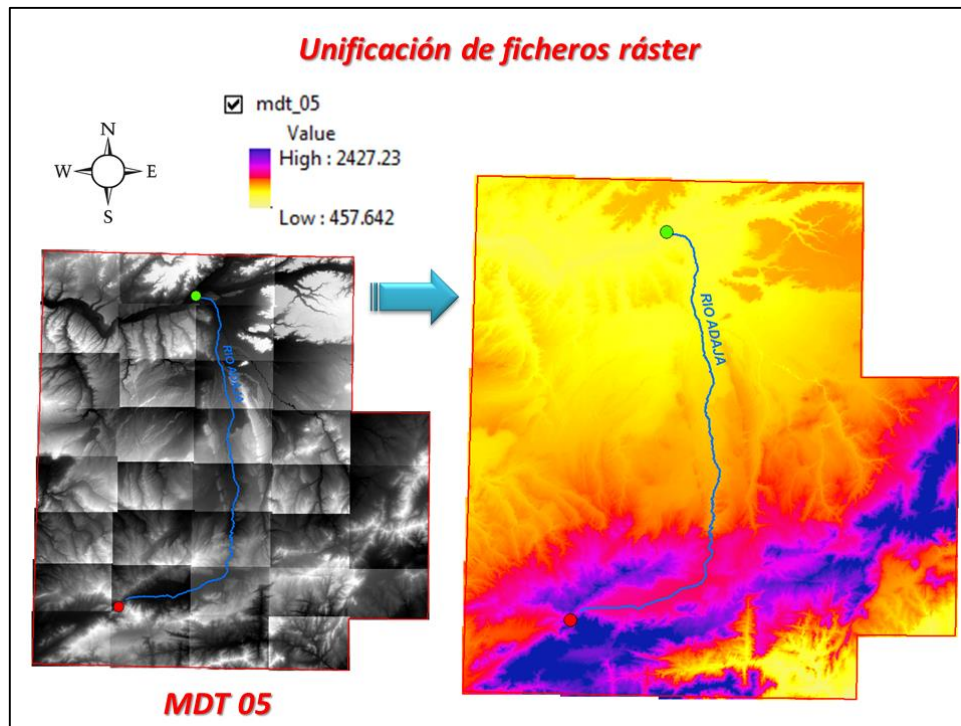


Figura 58. Unificación de ficheros ráster de MDT 05. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: CNIG.

7.1.2. Cálculo de estadísticas

Las estadísticas son necesarias para realizar ciertas tareas en las imágenes, tales como la aplicación de un aumento de contraste o la clasificación.

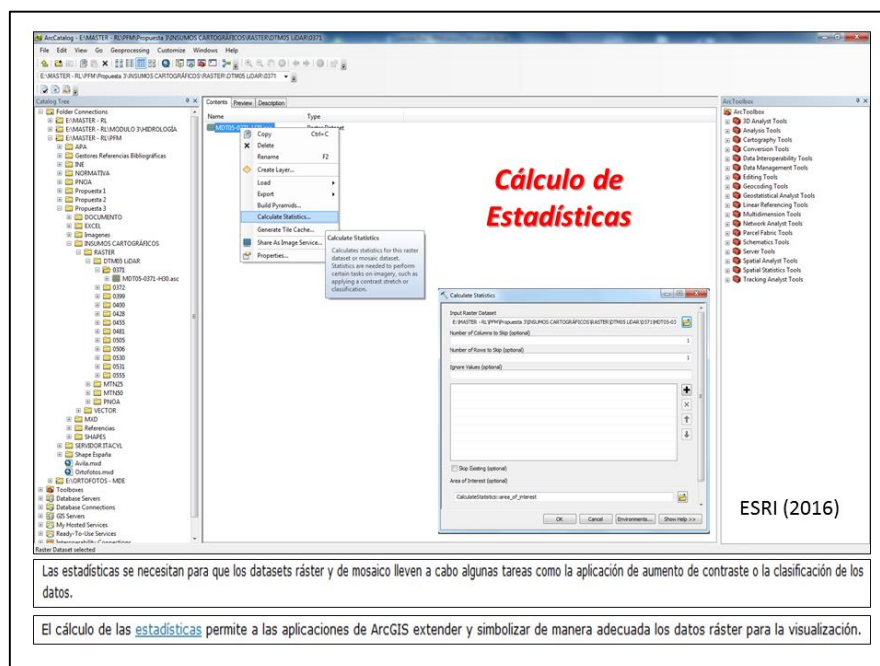


Figura 59. Cálculo de estadísticas. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: ESRI.

7.1.3. Creación de pirámides

Crear pirámides para dataset ráster permite maximizar el rendimiento del dibujo puesto que agiliza los procesos de despliegue y manipulación de los datos. Se recomienda crear pirámides para datasets ráster de gran tamaño.

El procedimiento informático de representación de imágenes en la pantalla de un ordenador consiste en básicamente “calcular que color asignar a cada píxel de la pantalla en función de los de la imagen” (Olaya, 2011), por lo que para imágenes que contienen miles de píxeles puede resultar costoso en términos de tiempo de despliegue, visualización y comodidad de la misma en el momento de su interpretación.

Con el propósito de ampliar el concepto de este procedimiento, se procede a consultar las bibliotecas de ayuda de ArcGIS. En la siguiente figura se ilustra el procedimiento operativo a ejecutar en la construcción de pirámides.

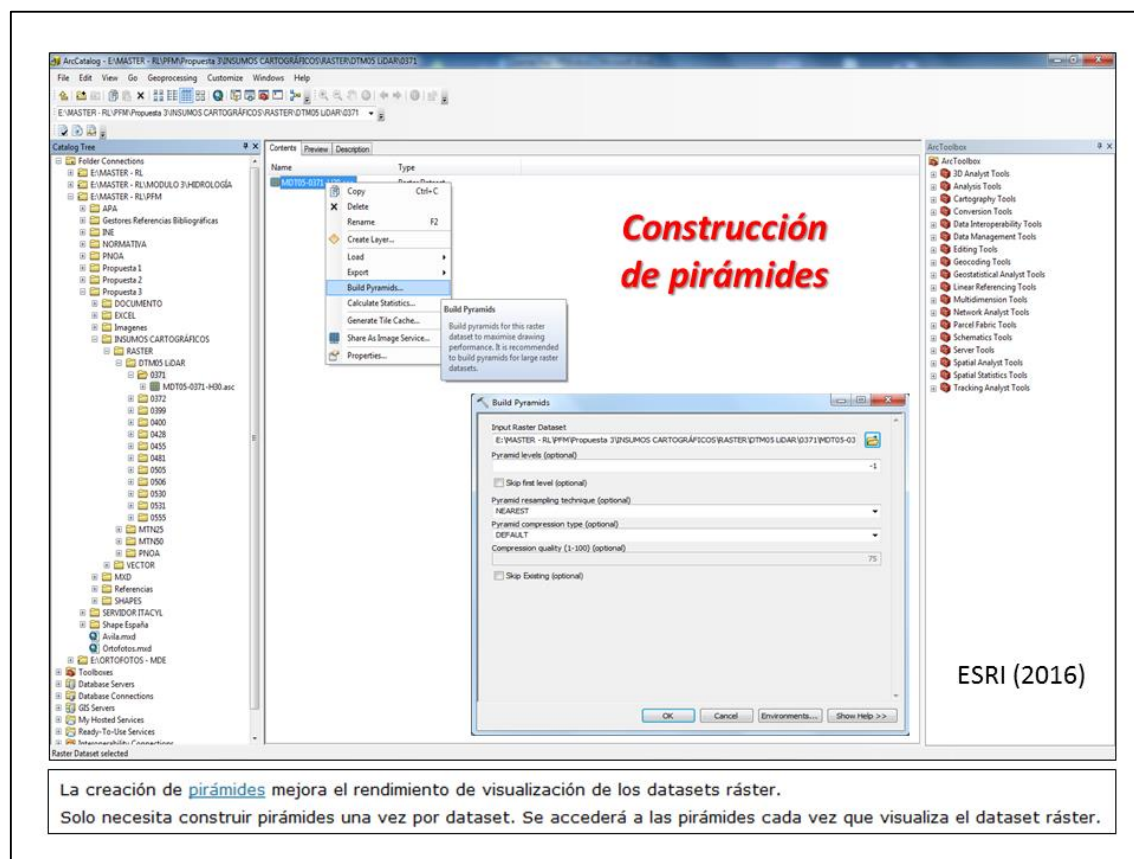


Figura 60. Construcción de pirámides. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.
Fuente: ESRI.

En la versión utilizada el software permite tener acceso simultáneo al módulo ArcCatalog desde la interfaz de ArcMap, por lo que este procedimiento se puede realizar desde cualquiera de ellas, incluso desde el módulo de ArcToolbox.

7.1.4. Construcción del fichero de dirección de flujo preliminar

Este fichero es preliminar porque, de manera directa, el software no lo calcula correctamente hasta que se han corregido ciertas "imperfecciones" sobre el MDT correspondiente a sumideros o zonas donde el flujo no circula.

En realidad, para el software son imperfecciones, pero para otros contextos estas áreas endorreicas son una posibilidad dentro de las variadas formas del terreno.

Más adelante, se detalla el proceso de "corrección" de estas zonas, y se le provee al software los medios para que pueda "entender" y calcular las posibles direcciones en las que el flujo puede seguir, desde una celda específica del MDT.

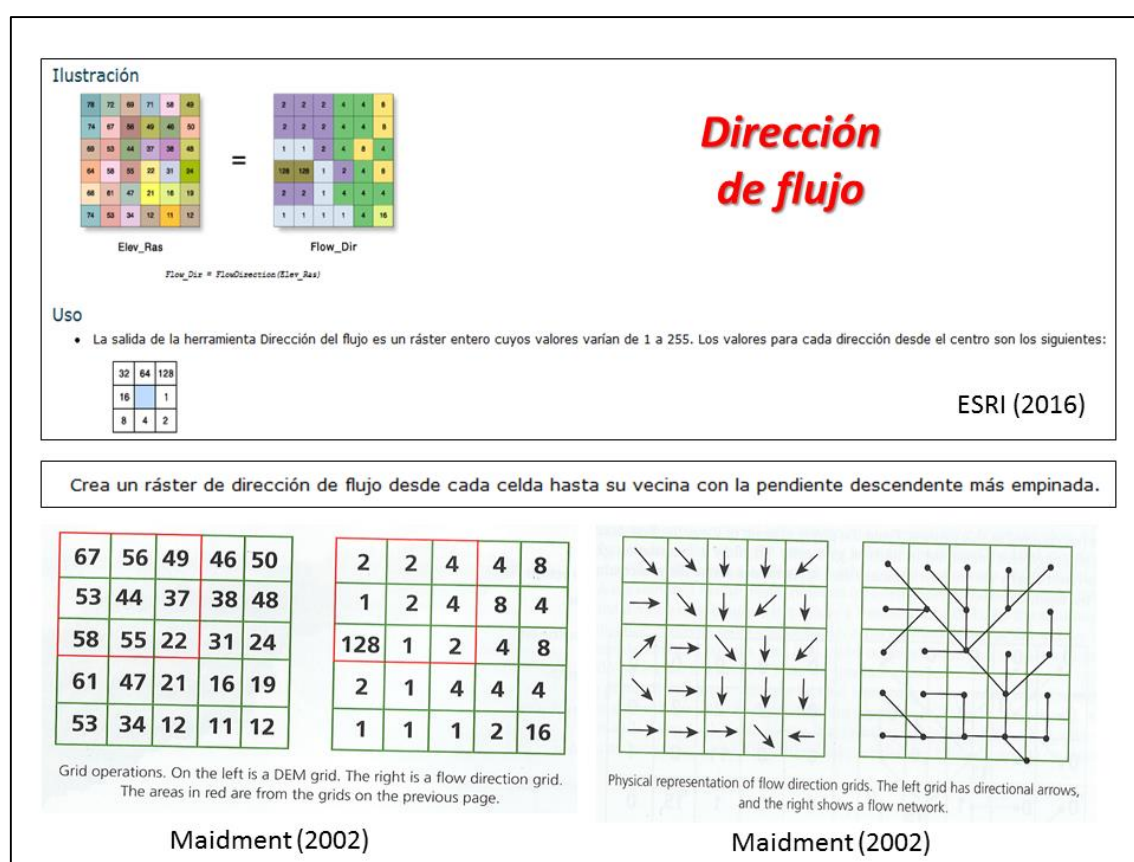


Figura 61. Fundamentos teóricos de la construcción del fichero de la dirección de flujo. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: ESRI.

De acuerdo con Olaya (2011) este mapa es imprescindible en el análisis hidrológico porque "definen el comportamiento hidrológico de cada celda como unidad aislada", además constituye la base para el cálculo de la cuenca de drenaje en la definición de los límites finales.

Cuando se tiene el mapa de dirección de flujo preliminar, el software no ha sido capaz de identificar las ocho (8) posibles para el cual se encuentra programado, porque existen aún zonas representadas por píxeles que indican

áreas donde el agua no fluye, que según Olaya (2011) corresponden a “zonas llanas y las depresiones, que representan un problema para la asignación de direcciones de flujo”

Una vez se realiza el cálculo del fichero sin corregir con las direcciones de flujo, cuya fuente principal es el MDE, se obtiene un resultado que luce de la siguiente manera:

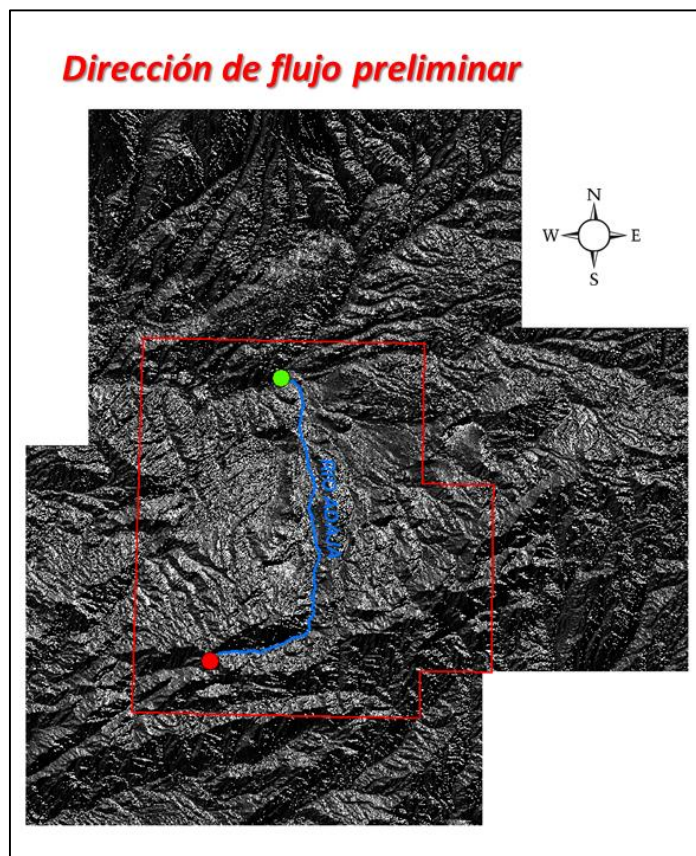


Figura 62. Fichero preliminar de la dirección de flujo. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: ESRI.

Se puede apreciar claramente que el mapa carece de sentido puesto que constituye una representación continua en escala de grises, y no separa las posibles direcciones del flujo, que es lo que se quiere identificar claramente como apoyo a los procesos posteriores de delimitación de la zona de interés.

7.1.5. Corrección y ajuste de los ficheros de dirección de flujo

Para la creación de un fichero con las direcciones de flujo en las ocho (8) posibilidades cardinales (N, S, E, W, NE, NW, SE, SW) es importante identificar los sumideros o zonas endorreicas, y rellenarlas.

Este proceso de relleno sugiere descartar zonas de sumidero en el cálculo del mapa final de flujo, puesto que a dichas zonas no es posible asignarles una de las ocho (8) posibilidades consideradas por el software en los cálculos finales.

Estas zonas introducen ruido al modelo ráster porque corresponden a zonas donde el agua no fluye y se estanca, y lo que se requiere es precisamente identificar hacia donde fluye el agua al interior de la subcuenca.

Las herramientas del módulo *Hydrology* de ESRI, diseñadas para la detección y eliminación de sumideros, presentan las siguientes características:

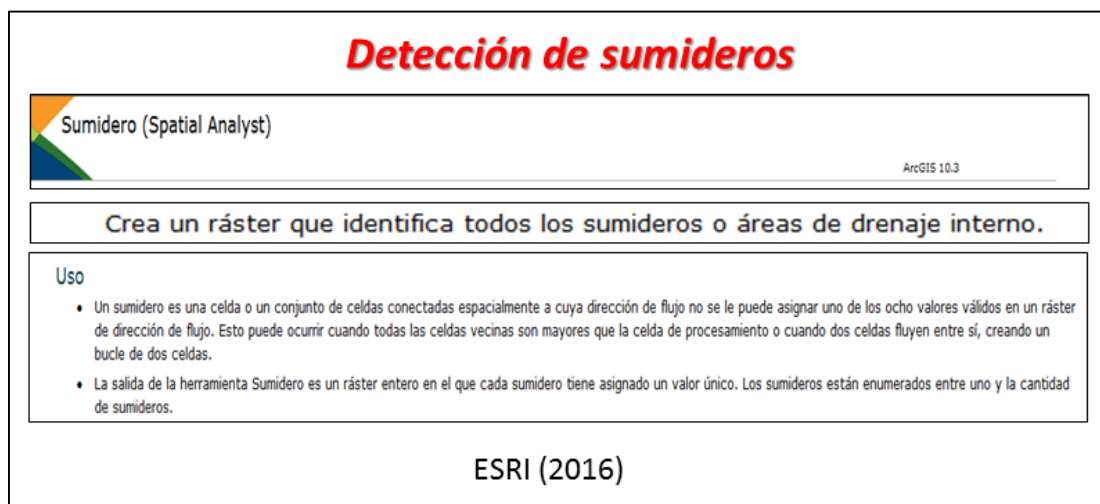


Figura 63. Herramienta para la detección de sumideros. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: ESRI.

La herramienta para la ejecución de este procedimiento se identifica en el inglés como "Sink" la cual "crea una capa ráster identificando todos los sumideros (áreas endorreicas o de drenaje interno) existentes en la zona analizada". (Ceballos Barbancho, 2016)

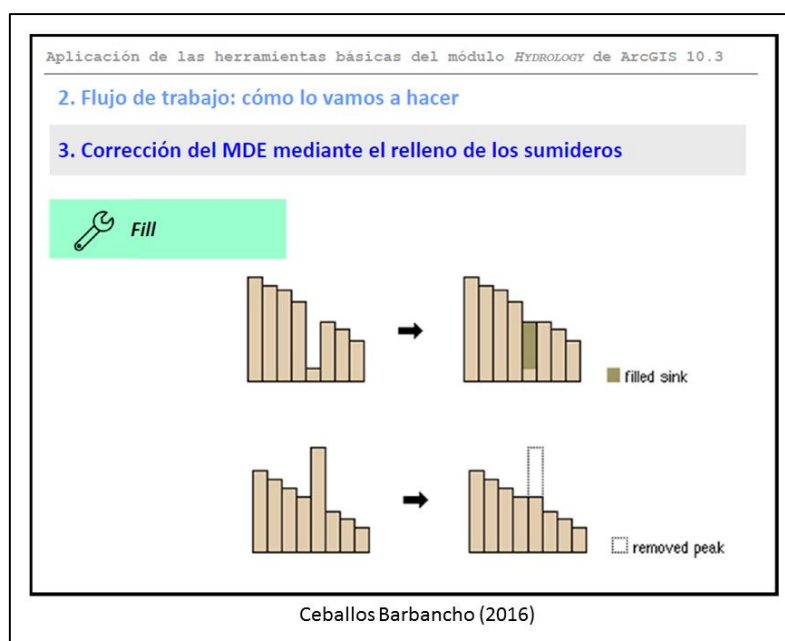


Figura 64. Corrección del MDE mediante el relleno de los sumideros.

La figura anterior ilustra, desde el perfil, el procedimiento de identificación de sumideros y llenado de los mismos, que corresponde al siguiente procedimiento a ejecutar con el propósito de eliminarlos del MDE para recalcular posteriormente el nuevo mapa de dirección de flujo.

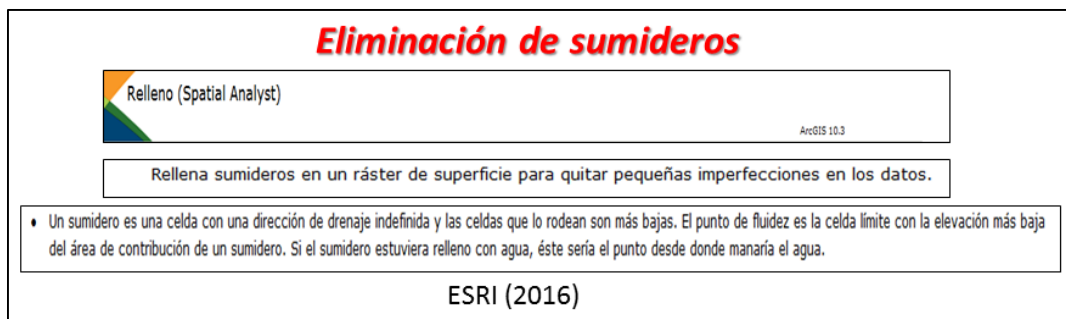


Figura 65. Herramienta para eliminación de sumideros. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: ESRI.

La herramienta para la ejecución de este procedimiento se identifica en el inglés como “Fill” la cual corrige las imperfecciones del MDE inicial realizando el respectivo llenado de sumideros o “zonas endorreicas”.

7.1.6. Construcción del fichero de dirección de flujo final

Por las razones antes mencionadas, es necesario alistar un MDE corregido desde donde será calculado el mapa de dirección de flujo final. Las ocho (8) posibles que detecta el software se corresponden con las direcciones cardinales que muestra la siguiente figura:

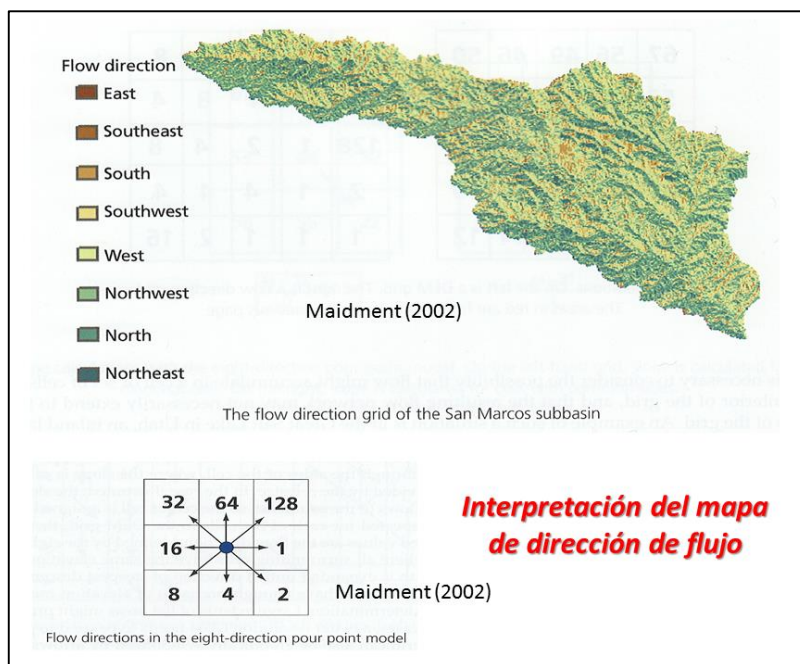


Figura 66. Interpretación del Mapa de dirección de flujo. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: ESRI.

La herramienta para la ejecución de este procedimiento se identifica en el inglés como “Flow Direction”, y crea un nuevo fichero ráster con la dirección de flujo para cada celda.



Figura 67. Fundamentos teóricos para el cálculo del mapa de dirección de flujo. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

En la siguiente figura se puede apreciar el resultado obtenido, cuya representación cobra sentido en la medida que ha identificado todas las direcciones para cada celda programadas en el software.

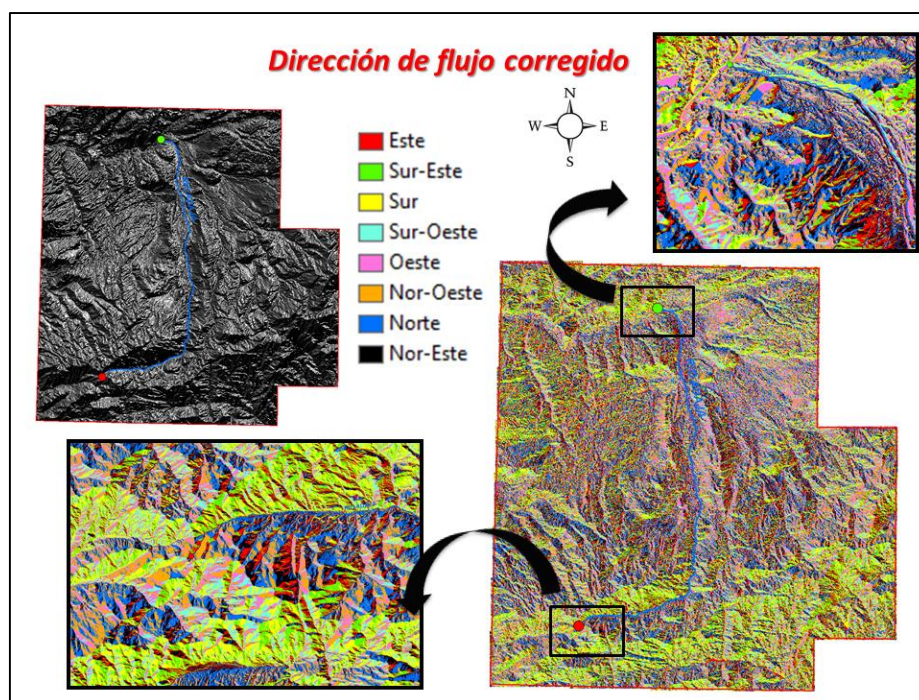


Figura 68. Ficheros de la dirección de flujo corregidos. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: ESRI.

7.1.7. Construcción del fichero de acumulación de flujo

La acumulación del flujo es otro de los parámetros fundamentales en el análisis hidrológico, especialmente en la extracción de redes de drenaje y determinación de su jerarquía. La ejecución de este algoritmo permite generar un fichero ráster para cada celda, y toma como base el fichero de dirección de flujo calculado anteriormente.

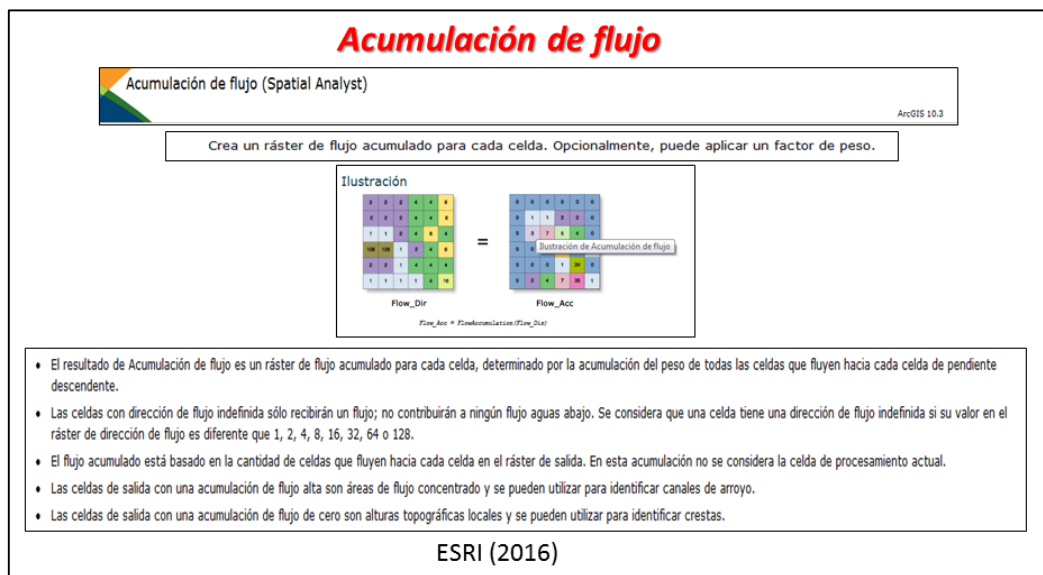


Figura 69. Herramienta para el cálculo del fichero de acumulación de flujo. Adaptación de la figura: Ray Lesmar. Fuente: ESRI.

Se identifican celdas hacia donde fluye todo el flujo de una determinada zona, por lo general, aquellas donde el agua escurre, se acumula y se canaliza para ser dispuesta, finalmente, a salir de la cuenca de drenaje por un solo punto.

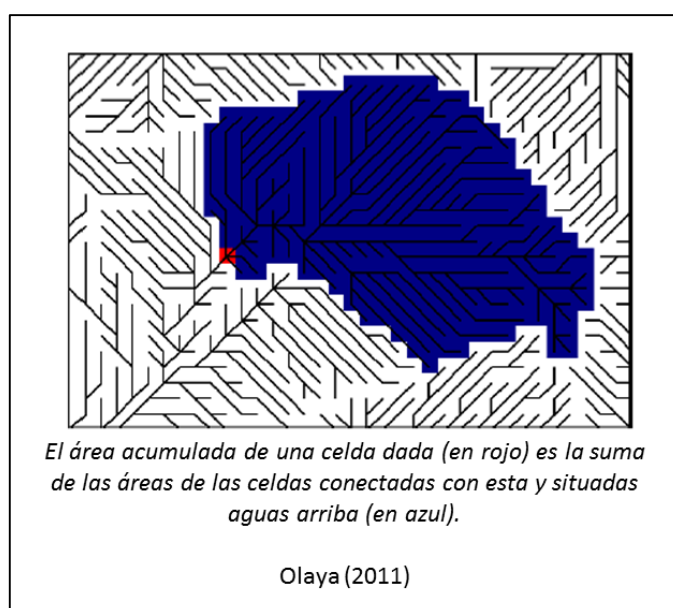


Figura 70. Acumulación de flujo.

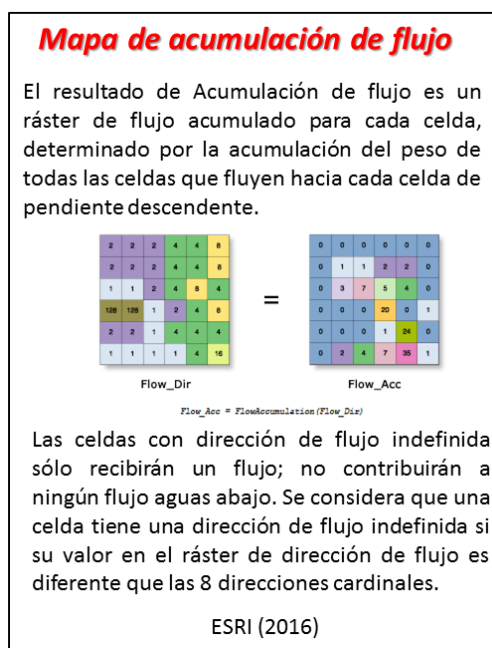


Figura 71. Fundamentos teóricos para el cálculo del mapa de acumulación de flujo. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Finalmente, se obtiene un fichero ráster que contiene valores continuos, que separan las zonas de mayor acumulación de las de menor acumulación. Como puede apreciarse en la siguiente figura, las zonas con mayor acumulación de flujo son las que presentan valores altos y, generalmente, corresponden a los cursos de los ríos y arroyos.

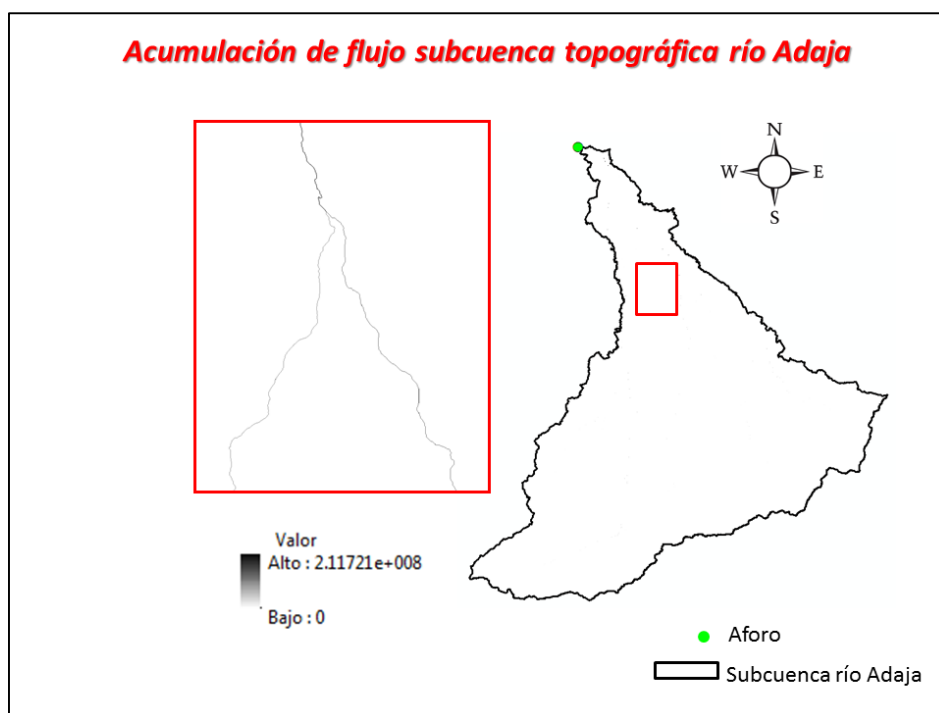


Figura 72. Acumulación de flujo de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

7.1.8. Identificación del punto de confluencia

El río Adaja nace en la Fuente del Ortigal y desemboca en el río Duero. Sus aguas fluyen, primero un tramo hacia el nororiente y luego hacia el norte gran parte, hasta que un pequeño tramo gira hacia el occidente antes de verter sus aguas al Duero. La identificación del punto de confluencia es importante porque es el punto que ha de especificársele al software para que "entienda" el lugar de partida desde donde se requiere iniciar la posterior delimitación de la cuenca de drenaje. El PNOA y el MTN25 integrados como fuentes ráster auxiliares y complementarias, han sido utilizadas para identificar dicho punto de confluencia.

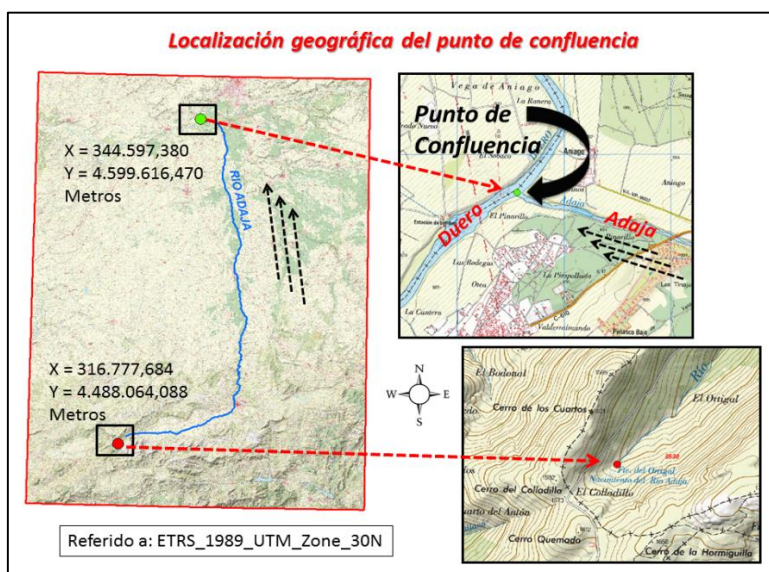


Figura 73. Localización geográfica del punto de confluencia. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

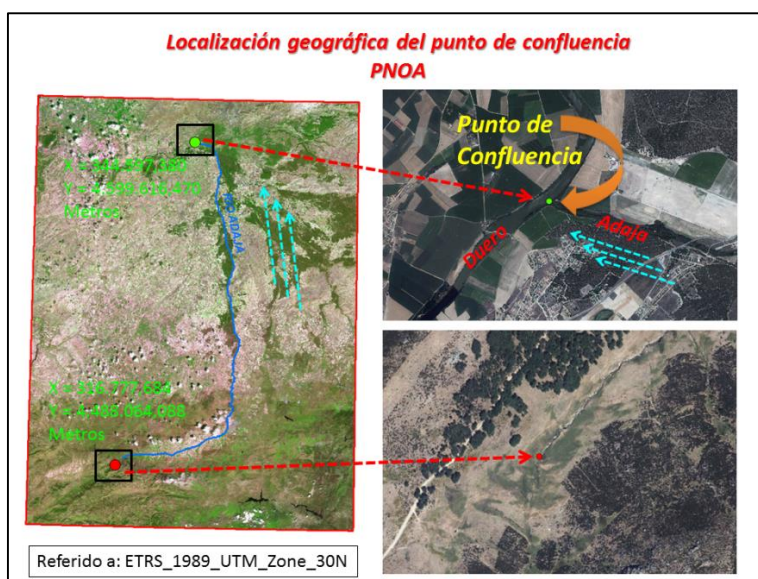


Figura 74. Localización geográfica del punto de confluencia sobre una vista PNOA. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

7.1.9. Delimitación de la subcuenca

Una vez resuelto el problema del cálculo de la acumulación de flujo, y fijado el punto de confluencia, desde donde se requiere iniciar la delimitación de la cuenca de drenaje de la subcuenca topográfica del río Adaja, se procede a realizar la delimitación de la misma utilizando procedimientos semiautomáticos.

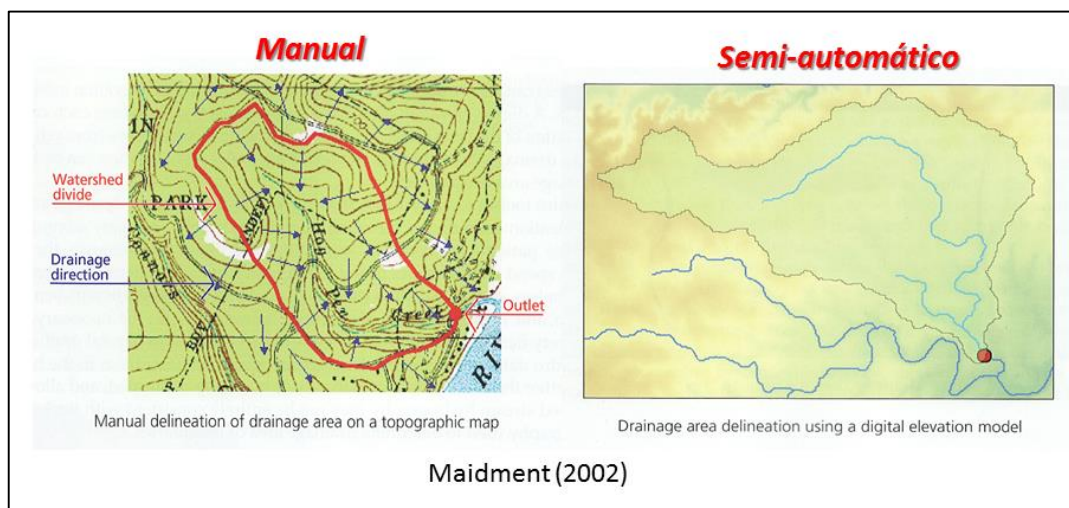


Figura 75. Metodologías para la delimitación de cuencas hidrográficas.
Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Básicamente el algoritmo utilizado por el software para el cálculo del límite de la subcuenca, consiste en recorrer una a una cada celda del MDE, y con base al fichero de dirección de flujo, aplicar una convolución en matriz de 3x3, para definir la condición local del pixel central. Según Ordoñez & Martínez (2003), "en dos celdas del mapa de orientaciones se unen los dos puntos medios del pixel central y se trazan dos segmentos formando 45° a cada lado de la línea de unión y, si el vector que indica la orientación está dentro de la zona comprendida entre ambos segmentos, el pixel pertenece a la cuenca, en caso contrario, no pertenece". La orientación a la que aquí hace referencia es aquella que indica una dirección del flujo del agua que escurre sobre la superficie topográfica del terreno.

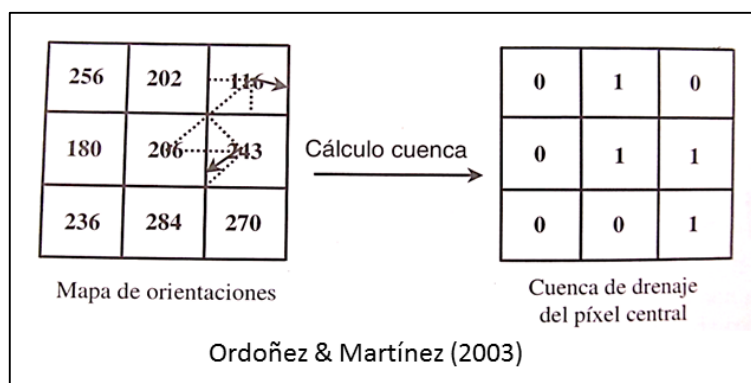


Figura 76. Fundamentos teóricos para el cálculo de la cuenca de drenaje.

La herramienta para la ejecución de este procedimiento se identifica en el inglés como “Watershed” la cual calcula la respectiva cuenca de drenaje, y desde la cual se “*puede delinear los límites de una determinada cuenca a partir de la demarcación de un punto de salida*”. (Ceballos Barbancho, 2016)

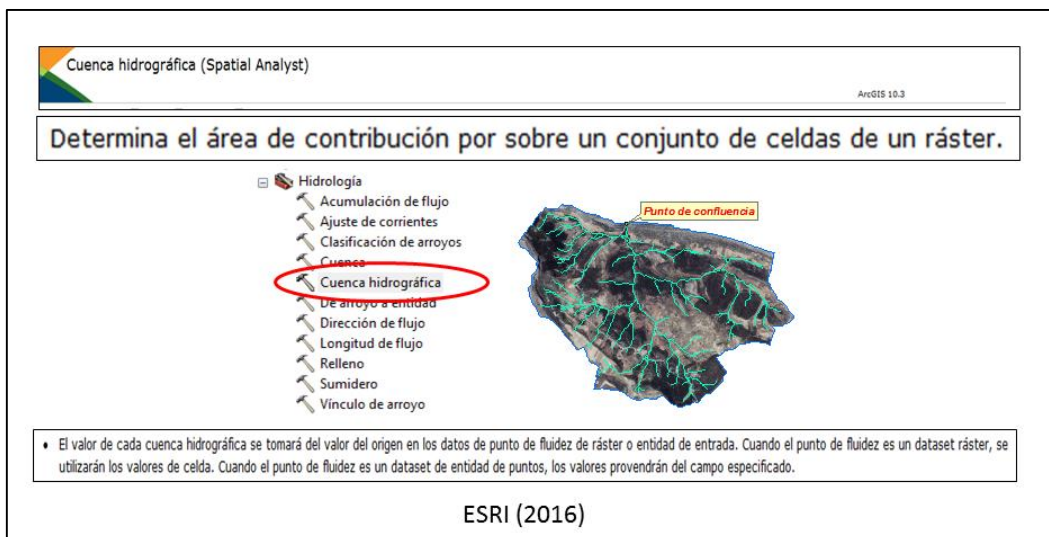


Figura 77. Herramienta para la delimitación de la cuenca de drenaje.
Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Al finalizar este procedimiento, de las 36 hojas del MTN50, luego de la delimitación final de la subcuenca, han quedado 21 hojas representando total o parcialmente una porción de la superficie de la zona de estudio, tal como se ilustra en la siguiente figura:

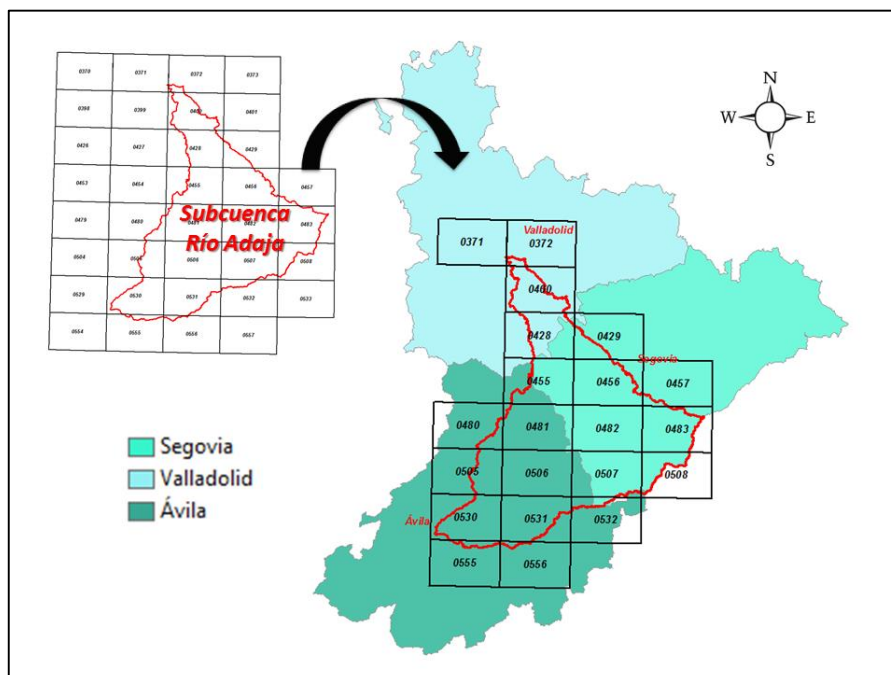


Figura 78. Correspondencia de la cuadrícula del MTN50 con la zona de estudio. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

7.1.10. Comparación de resultados y elección del límite final

Se ha elegido evaluar los resultados con el propósito de comparar estas tres (3) delimitaciones con lo que ha propuesto MAGRAMA (2016) desde un insumo similar con resolución intermedia de 100x100 metros. Adicionalmente, la CHD (2016) ha establecido un referente de área superficial de la subcuenca del río Adaja.

Consolidando estos datos, se reúnen cinco (5) fuentes, desde donde se analiza y se elige la propuesta que se considere el mejor criterio de delimitación de la zona de estudio, que es usado como base en todos los procesos cartográficos posteriores.

Altares (1993) afirma que "en la medición del perímetro de una cuenca hidrográfica y de sus cauces influyen criterios bastantes subjetivos". No obstante lo anterior, la elección del perímetro final de la subcuenca se basa en criterios objetivos derivados del análisis automático aplicado sobre el MDT.

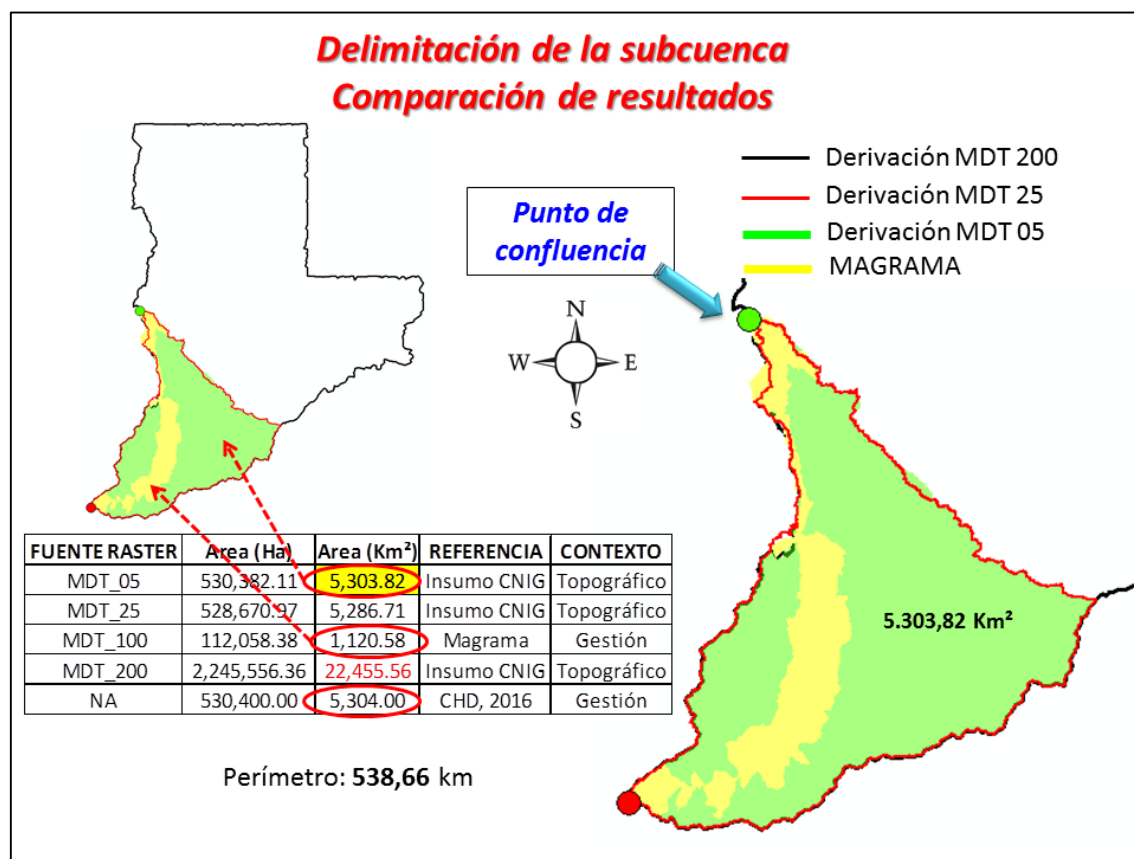


Figura 79. Comparación de los resultados de la delimitación de la zona de estudio. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

7.2. Generación de productos ráster derivados del MDE

Se ha hecho especial énfasis en el tratamiento de la información geográfica de tipo ráster, en especial aquella derivada del MDE, cuyos productos tales como mapa de pendientes, dirección de flujo, acumulación de flujo, orientaciones, superficies TIN o de redes de triángulos irregulares, sombreados, extracción de redes de drenaje y cálculo de jerarquía, se especifican a continuación.

Los mapas de dirección y acumulación de flujo no se mencionan aquí porque ya han sido descritos en el apartado anterior, sin embargo, en el capítulo de resultados se referencia en su totalidad como caracterizaciones orográficas de interés hidrológico.

Adicionalmente, se incluye el cálculo de la altura media de la subcuenca como parámetro de interés que puede ser útil en la interpretación de fenómenos asociados con las precipitaciones, la evaporación, la evapotranspiración y la vegetación, por ejemplo.

7.2.1. Cálculo de la altura media de la subcuenca

De manera puntual, el valor de la elevación de cada celda o pixel del MDE corresponde al valor medio que representa dicha superficie más o menos regular en forma de cuadrilátero. Sin embargo, puede extraerse la altitud media de la subcuenca utilizando las formulaciones que muestra la siguiente figura como una media ponderada por rangos de la variable, o por medio de métodos estadísticos básicos directos.

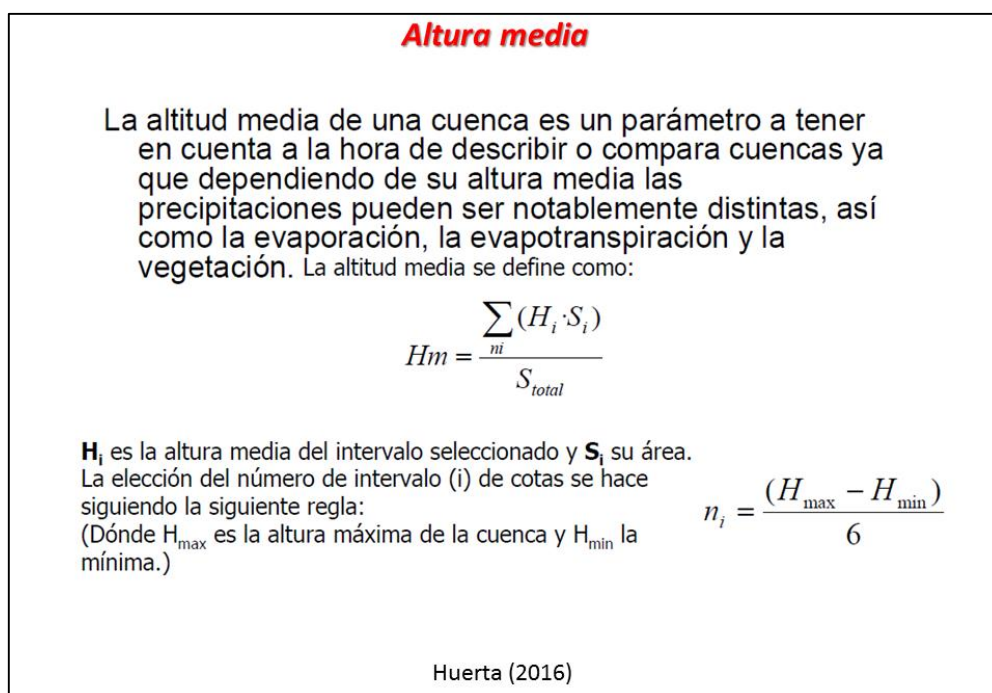


Figura 80. Fundamentos teóricos para el cálculo de la altura media. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

7.2.2. Generación del modelo TIN

Una manera de visualizar mejor la textura y/o rugosidad de las ondulaciones del terreno, es construyendo un modelo TIN o red irregular de triángulos. Para la generación de este producto basta con introducir el MDE de partida, y el software aplica principios de la triangulación de Delaunay, para construir triángulos irregulares cuyos nodos corresponden a un punto con posición conocida y que representa una altura específica. Es interesante ver como luce dicho modelo porque *"tiene la ventaja, respecto de los modelos de mallas regulares (como los MDE), de poder adaptarse a los terrenos con relieves variados"*. (Ordoñez & Martínez, 2003)

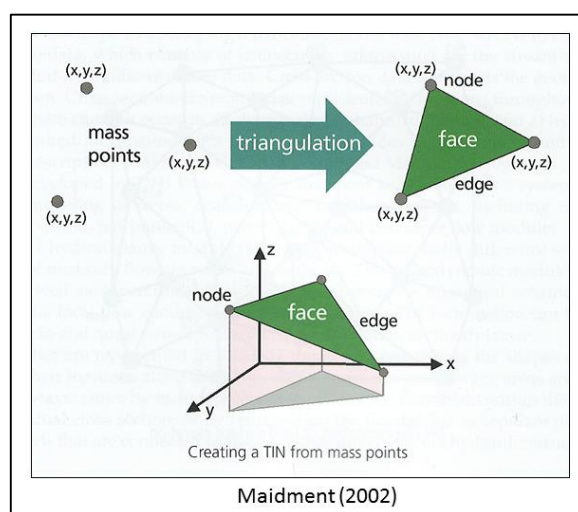


Figura 81. Fundamentos teóricos del modelo TIN.

La superficie TIN tiene la particularidad de reconstruir la superficie del terreno por medio de triángulos los cuales, de acuerdo con Olaya (2011) *"representa a una zona de características homogéneas"*

7.2.3. Generación del mapa de pendientes

Cada celda que representa el MDE encierra un área específica según la resolución espacial del fichero preliminar, sin embargo, el mapa de pendientes permite asociar a la celda una inclinación de la misma. Dicha inclinación se define como *"un punto del terreno se define como el ángulo que forma la vertical y la normal al terreno de ese punto"*. (Ordoñez & Martínez, 2003)

Calcular esta característica orográfica es importante porque puede ser muy útil en aplicaciones medioambientales relacionadas con problemas de erosión del terreno e inestabilidad de los mismos, entre otros.

Para calcular el mapa de pendientes, se toma como base el MDE, y se aplica una matriz regular 3x3 que, a manera de convolución, recorre cada una de las celdas, realizando cálculos con base a los valores almacenados en los pixeles vecinos. De acuerdo con Gutiérrez & Gould (2010), *"el valor de la celda central de la ventana se obtiene a partir del cálculo del valor de las pendientes"*

existentes entre esa celda y las celdas vecinas". No obstante, Olaya (2011) insiste en la importancia de este tipo de información puesto que "el área real que se encuentra disponible para los seres vivos que habitan en esa celda, debería considerar la influencia de la pendiente".

La herramienta para la ejecución de este procedimiento se identifica en el inglés como "Slope" la cual calcula la pendiente o inclinación para cada celda o pixel, y genera un nuevo fichero ráster cuyos valores pueden ser expresados en porcentaje o en grados sexagesimales.

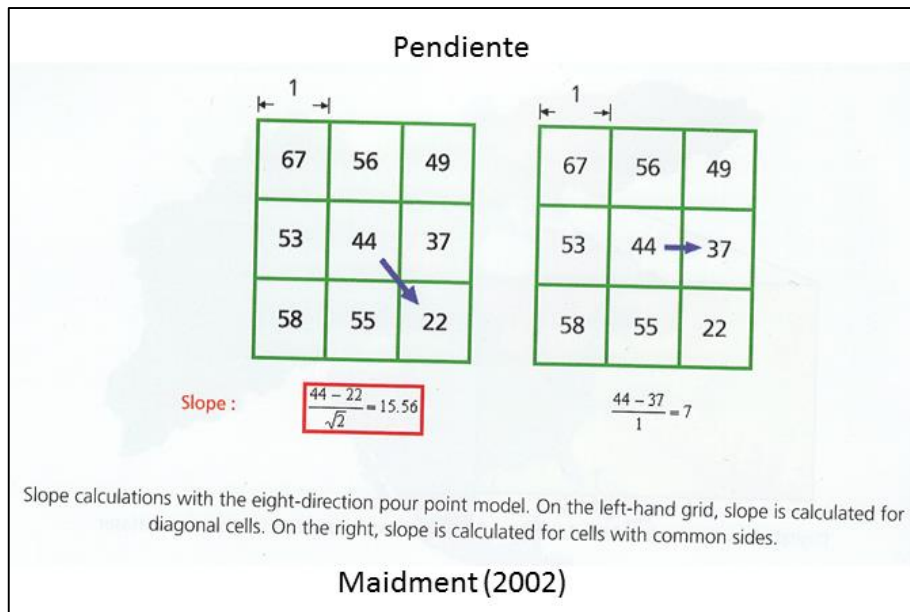


Figura 82. Fundamentos teóricos del mapa de pendientes.

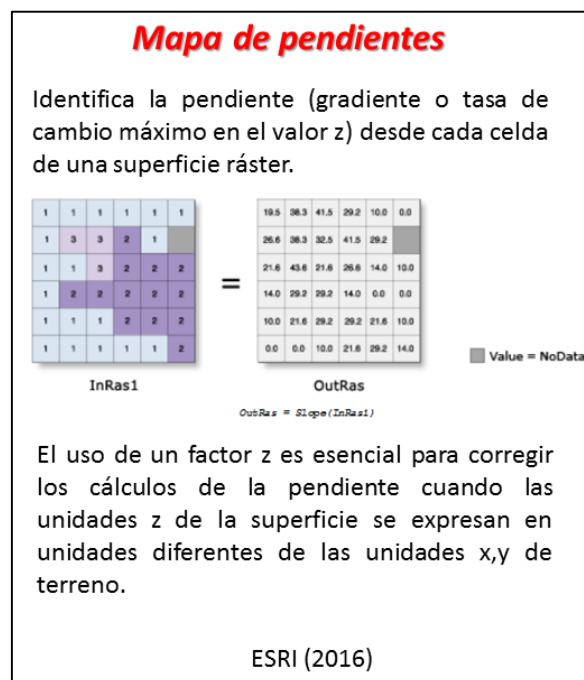


Figura 83. Fundamentos teóricos para el cálculo del mapa de pendientes.

7.2.4. Generación del mapa de orientaciones

Otro fichero derivado del MDE es el mapa de orientaciones que, a diferencia de la pendiente, se define como "el ángulo que forma la proyección de la normal al terreno en ese punto con la dirección del norte". (Ordoñez & Martínez, 2003)

Sin duda, se trata de información relevante en el análisis hidrológico puesto que la orientación en un punto de la superficie topográfica puede indicar una variación importante en las precipitaciones, por ejemplo, "en los lugares del hemisferio norte las cuencas con orientación norte tienen mayores precipitaciones". (Huerta, 2016)

Además, su importancia deriva en que, dependiendo de la orientación del terreno, el desarrollo de las especies vegetales puede adoptar uno u otro comportamiento, así como resulta información ideal para detectar zonas óptimas para la instalación de centrales de energía solar, como iniciativas de desarrollo sostenible en la promoción del uso de energías renovables, entre otras.

La siguiente figura ilustra de manera sustancial y clara la diferencia entre los conceptos de pendiente y orientación del terreno:

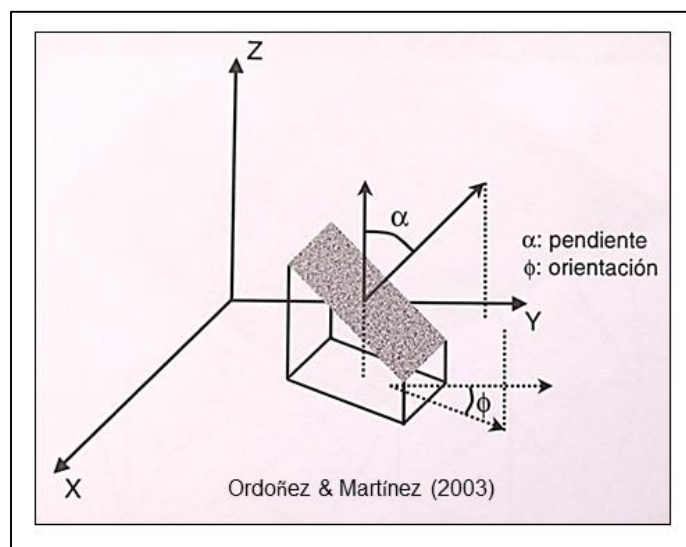


Figura 84. Fundamentos teóricos de los ángulos de pendiente y la orientación.

El software toma como base el MDE, quien aplica la máscara 3x3 pixel a pixel, y genera un nuevo fichero ráster cuyos valores se expresan en grados de 0 a 360. Hay zonas en las que el software no puede calcular dicho ángulo que define la orientación de la celda, como por ejemplo sobre zonas planas, por lo que les asigna el valor -1.

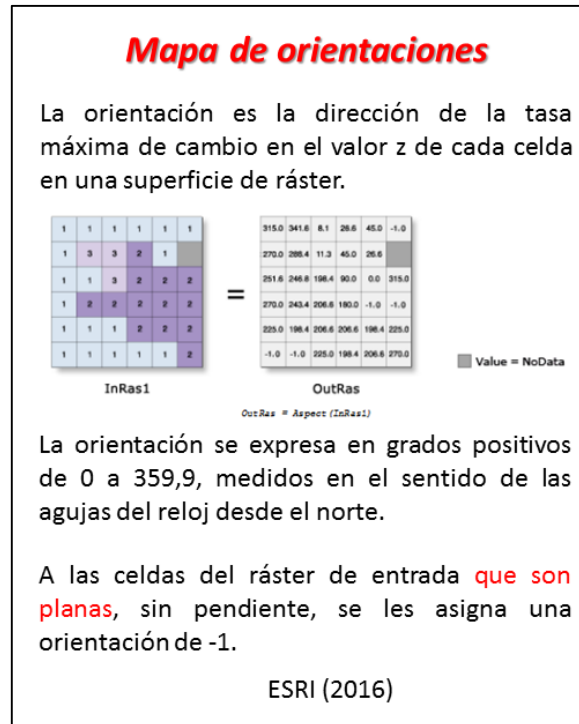


Figura 85. Fundamentos teóricos para el cálculo del mapa de orientaciones.
Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

7.2.5. Generación del mapa de sombreado

Otro derivado importante a tener presente es el mapa de sombras que indica la iluminación relativa del sol incidente sobre cada celda, en un instante de tiempo específico y con base a la topografía del terreno, y permite tener una mejor claridad visual de las formas del terreno sobre un modelo cartográfico. De acuerdo con Ordoñez & Martínez (2003), *“Además de permitir apreciar el relieve del terreno, los mapas de sombreado se pueden utilizar para generar mapas de insolación”*.

La generación de los mapas de insolación a partir de los mapas de sombreado, han de enmarcarse dentro de los desarrollos futuros. Su importancia radica básicamente en que pueden ser útiles *“para el estudio de la distribución de especies vegetales y animales, y también para encontrar emplazamientos adecuados para la construcción de edificios o instalaciones industriales, como pueden ser las centrales de energía solar”*, constituyendo así, junto a los mapas de orientaciones, un insumo relevante en el análisis de la orografía del terreno con fines sostenibles.

Se calcula con base al MDE, el cual crea un nuevo fichero ráster con las sombras del relieve, representado con valores de 0 a 255 niveles de grises. Esto permite distinguir fácilmente zonas de sombra con zonas de alta iluminación solar.

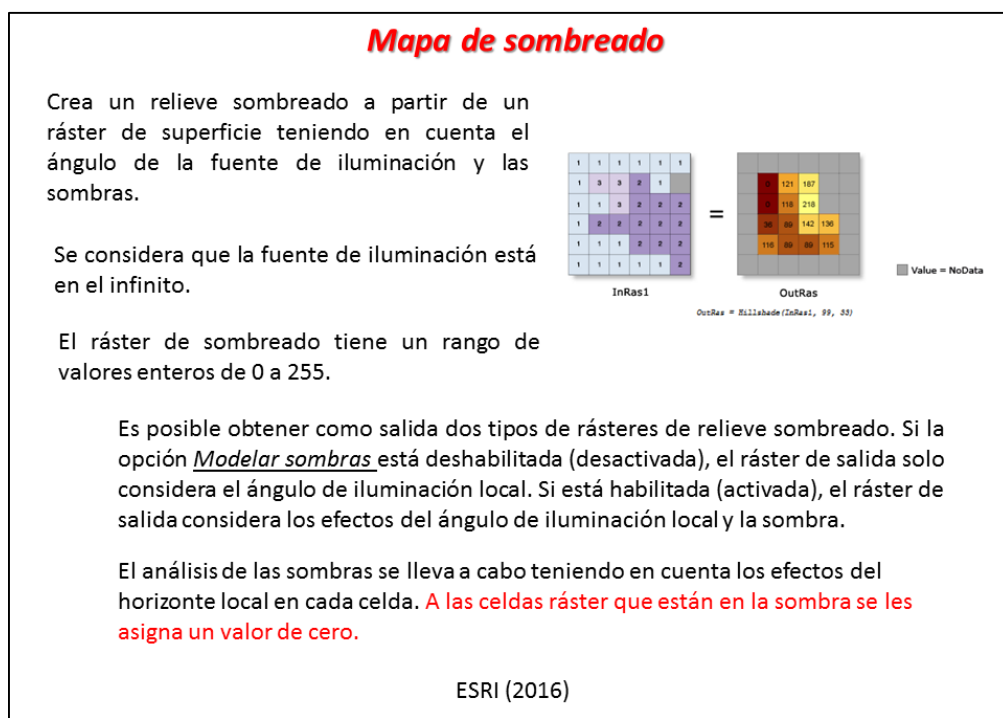


Figura 86. Fundamentos teóricos para el cálculo del mapa de sombreado.
Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

7.2.6. Extracción de redes de drenaje y determinación de jerarquía

La construcción anterior del fichero de acumulación de flujo será la base principal para la extracción de la red de drenaje y sus posteriores caracterizaciones en órdenes o jerarquías. En principio, el cálculo de la red de drenaje se realiza de manera semiautomática puesto que hay que definir un umbral que “partirá” las acumulaciones de flujo en dos grupos: uno con mayores acumulaciones y otros con menores acumulaciones de flujo.

Este producto se ha considerado puesto que, de acuerdo con Olaya (2011) “la extracción de redes de drenaje es una de las tareas principales del análisis hidrológico”, y aunque el resultado obtenido no constituye la base de caracterización hidrográfica de la subcuenca, puesto que esta se extrae de los ficheros vectoriales de la IDECyL A ESCALA 1:10.000, ofrece una representación aproximada de dichos drenajes y sirve como base para la posterior determinación de las características de orden y/o jerarquía de los mismos siguiendo criterios específicos que se detallan más adelante.

La presente figura muestra las tres (3) metodologías aplicadas, siguiendo criterios específicos, que arrojaran resultados variables. Los tres (3) criterios implementados son:

- **CRITERIO 1**

Se define el umbral de decisión para la extracción de la red de drenaje principal correspondiente al 1% del total de las celdas de la cuenca.

- **CRITERIO 2**

Se define el umbral de decisión para la extracción de la red de drenaje principal correspondiente a 1.000.000 m² del total de las celdas de la cuenca equivalente a 40.000 celdas en un MDT de 5x5 metros de resolución espacial.


- **CRITERIO 3**

Se define el umbral de decisión para la extracción de la red de drenaje principal correspondiente al valor representativo del número de celdas que drena en cada uno de los puntos de control seleccionados.

Aplicación de las herramientas básicas del módulo *HYDROLOGY* de ArcGIS 10.3

2. Flujo de trabajo: cómo lo vamos a hacer

5. Definición de la red de drenaje

**Raster Calculator**

Tenemos que decidir que número mínimo de celdas drenan hacia un determinado punto de la cuenca para que se produzca incisión del terreno y observemos la existencia de un cauce

- Considerar el nº de celdas equivalente al 1 % de la superficie total de la cuenca (Tarboton et al., 1991).
- Utilizar un umbral superficial fijo. Por ejemplo Jiménez & Olaya (com. per.) recomiendan 1.000.000 m² = 40.000 celdas o píxeles de 5 x 5 m.
- Decidir la superficie de acuerdo con las características de la zona de estudio tras analizar la ortofoto, visitar el terreno, etc.

Ceballos Barbancho (2016)

Figura 87. Definición de la red de drenaje.

La elección del umbral para el caso del criterio 3, puede depender en gran medida de la afinidad del intérprete en la elección de los puntos de control identificados con apoyo de fuentes ráster como las ortofotografías del PNOA o el MTN25, además que *“la elección de un umbral debe realizarse de tal modo que la red de drenaje coincida en la mayor medida posible con la realidad fisiográfica, tanto en la coincidencia de las cabeceras con los puntos reales de nacimiento de los cauces como en el número de estos”*. (Olaya, 2011)

En el capítulo de resultados se puede apreciar la claridad en la definición de los drenajes utilizando uno y otro criterio.

Posteriormente, se procede a elegir la red de drenaje sobre la cual se aplicará la caracterización del orden y/o jerarquía del mismo. Para ello, se utiliza la que resulte el mejor representante del drenaje de la subcuenta, según los criterios aplicados para la elección del umbral. Dicha elección puede identificarse realizando una comparación visual de los drenajes hipotéticos con los drenajes “reales” que pueden consultarse claramente del MTN25.

La herramienta para la ejecución de este procedimiento se identifica en el inglés como “Stream Order” y puede ejecutarse utilizando dos (2) metodologías específicas: los métodos de Strahler y Shreve, que según Olaya (2011), si se usa Strahler *“solo serían consideradas como celdas de salida aquellas confluencias en las que se unan cauces de igual orden”*, mientras que si se usa Shreve *“se tiene una subcuenca para cada subtramo, ya que estos órdenes varían en cada confluencia”*.

Al final el proceso, por uno u otro método, se obtiene una clasificación de los drenajes y con ello un número que indica el orden del drenaje, en el que *“el orden de la cuenca es el mismo que el del cauce principal en el punto de obra”*. (Huerta, 2016), cuyo punto de obra se identifica con el punto de confluencia definido previamente.

A continuación se ilustra algunos ejemplos generales que ayudan a comprender de manera más amplia el concepto de orden y/o jerarquía del drenaje:

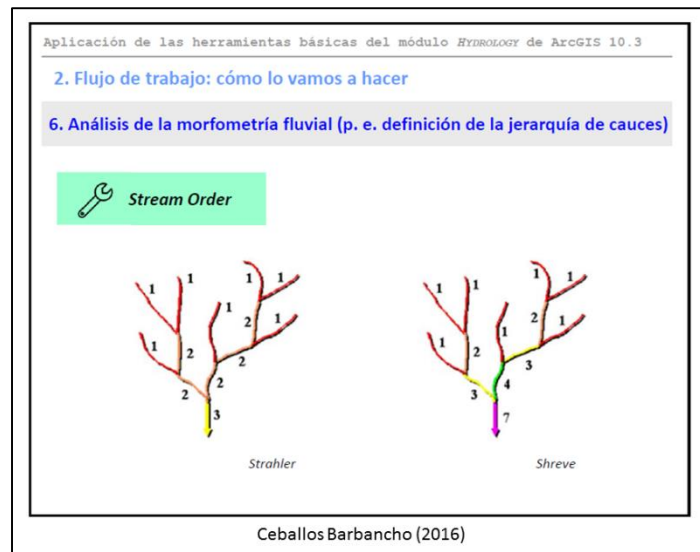


Figura 88. Análisis de la morfometría fluvial (definición de la jerarquía de cauces).

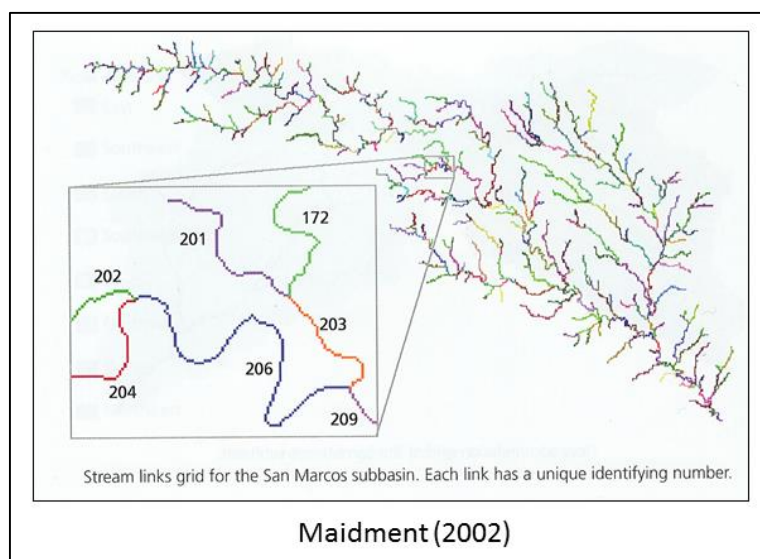


Figura 89. Esquema teórico de la jerarquía de drenaje.

7.3. Productos finales y selección de las capas temáticas

En el presente apartado se relacionan las capas temáticas a considerar para la caracterización física de la subcuenca, así como la lista de mapas que constituyen productos finales configurados en plantillas específicas adaptadas para su respectiva impresión.

Se eligen las temáticas a integrar por capas independientes y estructuradas en formato SIG, de todos los aspectos básicos orientados principalmente a obtener una caracterización física superficial de los aspectos ambientales, orográficos, geológicos, climáticos, importantes e imprescindibles para derivar (como perspectiva en futuros desarrollos) un completo análisis hidrológico, desde los aspectos más básicos y triviales hasta la generación de información compleja relacionada con la dinámica del agua, que deben estudiarse para conocer variables que aportarán significativamente en aspectos de uso, demanda, consumo y retorno del agua en la cuenca.

En capítulos anteriores se ha mencionado acerca de la utilidad de este repositorio cartográfico, y la importancia que ello representa en el conocimiento de la dinámica del agua al interior de la subcuenca. Por ello, el criterio de elección de las temáticas responde en su mayoría a criterios objetivos extraídos de la literatura, y con algún posible ajuste propuesto por el autor.

Es fundamental que la organización de la BDG esté orientada al análisis espacial como agregado principal y esencia de los SIG, y que, considerando ciertos desarrollos futuros relacionados con la vectorización, la estructuración y la adecuación topológica, esta BDG pueda convertirse en un potente motor de análisis espacial que, de acuerdo con Olaya (2011) este constituye “*el estudio cuantitativo de aquellos fenómenos que se manifiestan en el espacio*”.

La elección de dichas temáticas responde básicamente a lo que expone la literatura y, consecuentemente, los aspectos en que coinciden dichos importantes referentes literarios.

Altares (1993) propone que *"una cuenca hidrográfica se define por dos aspectos principales: la cuenca topográfica y la cuenca hidrogeológica"*, y que la recopilación de información para su respectiva caracterización y análisis incluye aspectos tales como cartografía, en primera instancia. Añade que el aspecto cartográfico debe contener la cartografía topográfica y geológica, edafológica, de vegetación y aptitudes de cultivo a varias escalas. Indica también que *"Normalmente se calculan: Superficie; Longitud del cauce principal; Perímetro; Índice de pendiente; Índice de compacidad; Índice de drenaje; Altitud media; Rectángulo equivalente; Curva ipsométrica"*.

Por su parte, el MMA (1997) (hoy MAGRAMA) afirma que *"las cualidades esenciales de una cuenca hidrográfica con fines de planificación se dividen en cuatro apartados: marco físico, demográfico, económico y desarrollo del aprovechamiento de los recursos hidráulicos en el tiempo"*, por lo que los objetivos principales del proyecto es abordar el marco físico, desde la integración de información geográfica en formatos vectoriales y ráster, dando especial importancia a la información ráster y sus productos derivados. El MMA (1997) añade que dicho marco físico debe contener la morfología del terreno, un inventario cartográfico detallado, la climatología, la hidrografía, las características geológicas y edafológicas, la ocupación del suelo y la infraestructura viaria.

Por su parte Ordoñez & Martínez (2003) consideran que *"la caracterización de cuencas hidrográficas debe empezar por identificar ciertos atributos relacionados con: definición de la cuenca de drenaje; análisis visual de la cuenca de drenaje; sombras e insolación"*, mientras que Olaya (2011) propone que una caracterización de una cuenca hidrográfica debe incluir aspectos tales como: *"área, perímetro, altura media, centro de masas, histograma de frecuencias de sus variables altitudinales, curva hipsométrica, distancia de flujo desde cada celda hasta el punto de salida (confluencia), tiempo de concentración de la cuenca; índices hidrológicos (índice topográfico de humedad, índice de potencia del cauce, factor topográfico LS), análisis de visibilidad de cuenca; caracterización de las formas del terreno, perfiles de los cauces, etc."*, varios de los cuales han de proponerse como desarrollos futuros. También afirma que el análisis hidrológico debe incluir aspectos relacionados con las direcciones de flujo, identificación de zonas llanas y depresiones, área acumulada (acumulación de flujo), extracción de redes de drenaje y jerarquía del mismo, aspectos que, si se desarrollan de manera detallada porque, en principio, son la base para la definición de la cuenca de drenaje de la subcuenca asociada al cauce principal del río Adaja.

A continuación, se relaciona una ilustración que propone las temáticas con información geográfica, vector y ráster, que debe tenerse en cuenta al momento de estructurar una BDG para la proyección de futuros análisis de tipo hidrológico:

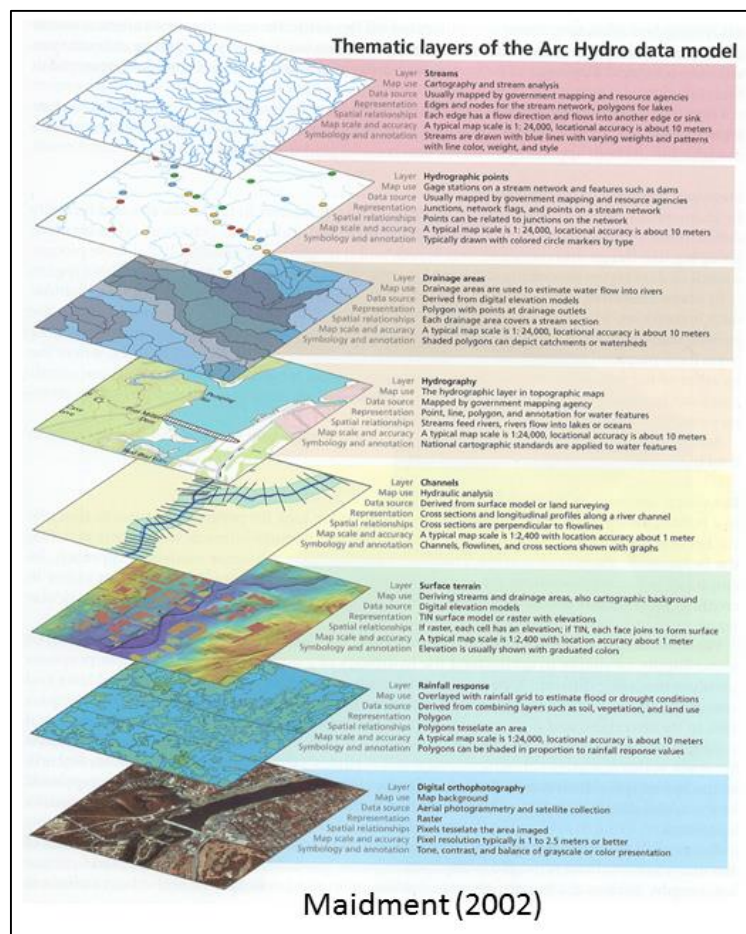


Figura 90. Fundamentos teóricos de las temáticas de una BDG con énfasis hidrológico.

7.3.1. Temáticas

Es clara la coincidencia en lo que respecta a los aspectos más relevantes a tener presente en una configuración cartográfica con fines de análisis hidrológico y posteriores aplicaciones en la Planificación del agua. Teniendo en cuenta dichos criterios, de manera general, los productos finales a generar, y las temáticas a tener en cuenta en el presente trabajo son:



Figura 91. Temáticas seleccionadas para la caracterización física de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

7.3.2. Lista de mapas

Con el propósito de generar una representación análoga e impresa de las principales características de la subcuenca del río Adaja, se organiza una serie de mapas en plantillas ajustadas con tamaños y escalas específicos, correspondiente con los siguientes ejemplares:

- Mapa de cartografía base
- Mapa de ortofotografía aérea PNOA
- Mapa Topográfico Nacional 1:25.000 MTN25
- Mapa de ocupación del suelo SIOSE 2011

- Mapa geológico MAGNA 50
- Mapa geológico CHD
- Mapa edafológico CHD

- Mapa de precipitación total anual
- Mapa de temperatura media anual
- Mapa de evapotranspiración potencial anual
- Mapa de evapotranspiración real anual
- Mapa de esorrentía total anual

- Mapa de elevaciones
- Mapa de pendientes
- Mapa de orientaciones
- Mapa de sombreado
- Mapa de cuencas vertientes
- Mapa de dirección de flujo
- Mapa de acumulación de flujo
- Mapa de jerarquía del drenaje

Se organizan a manera de anexo en formato listo para impresión como imagen sencilla estandarizada (PDF o JPEG). Cada salida gráfica se ajusta a una escala 1:50.000, junto con una que ilustra de manera general toda el área superficial de la subcuenca.

7.4. Rangos de escala y sistemas de referencia

7.4.1. La escala de trabajo

La (s) escala (s) de trabajo ha de definirse en función de la información geográfica disponible y las combinaciones multiescala elegidas para las caracterizaciones respectivas.

En el presente trabajo se ha elegido integrar cartografía en distintas escalas tales como:

- Características topográficas del relieve: 1:25.000
- Hidrografía: 1:10.000
- Infraestructura vial: 1:10.000
- Ocupación del suelo: 1:25.000
- Aspectos Geológicos y edafológicos: 1:25.000, 1:50.000.
- Aspectos climáticos: 1:1.000.000

Tomlinson (2007) afirma que *"una buena regla es evitar cambiar de escala más de dos veces y media en cualquier dirección"*, no obstante, dicho consejo no se cumple para todas las temáticas porque puede resultar poco significativo integrar cartografía de escalas pequeñas (como la climática) ya que son fenómenos que presentan poca variabilidad a escalas grandes.

Al final, todas las temáticas se organizan en salidas gráficas en formato de impresión, y se tiende una cuadrícula o grilla para generar mapas a escala 1:50.000, desagregando el detalle de cada temática a 21 hojas ajustadas a un tamaño de papel que se corresponde con dimensiones A2, el cual se detalla en un capítulo posterior.

Algunas temáticas como la climática, han de producir un mapa final a escala 1:350.000 y no será desagregado en hojas debido a que su variabilidad no resulta significativa a escalas mayores, como si ocurre con la representación gráfica de los aspectos hidrográficos, por ejemplo.

El propósito es analizar la mejor escala posible ajustada a un tamaño de papel de impresión cómodo, de tal manera que los detalles mínimos de las cartografías de escalas mayores se aprecien y sean lo suficientemente legibles para el usuario final, por lo que se busca que *"esta representación ha de tener un tamaño final manejable, con objeto de que pueda resultar de utilidad y permitir un uso práctico"*. (Olaya, 2011)

7.4.2. El sistema de referencia utilizado

Es tan importante tratar con información geográfica georreferenciada como también ponerla en un mismo sistema para favorecer su análisis e interpretación lógica. Este procedimiento consiste básicamente en referir la cartografía sobre una superficie regular elipsoidal de revolución y, posteriormente utilizar una proyección cartográfica para disponerla sobre un plano y poder mediar áreas y longitudes reales.

Los sistemas de referencia geográficos y proyectados utilizados en la cartografía del presente trabajo son: Sistema de Referencia Terrestre Europeo de 1989, sobre el que está asociado una proyección Universal Transversa de Mercator, en el Huso 30 (UTM ETRS 1989 Zona30). Datum vertical Alicante.

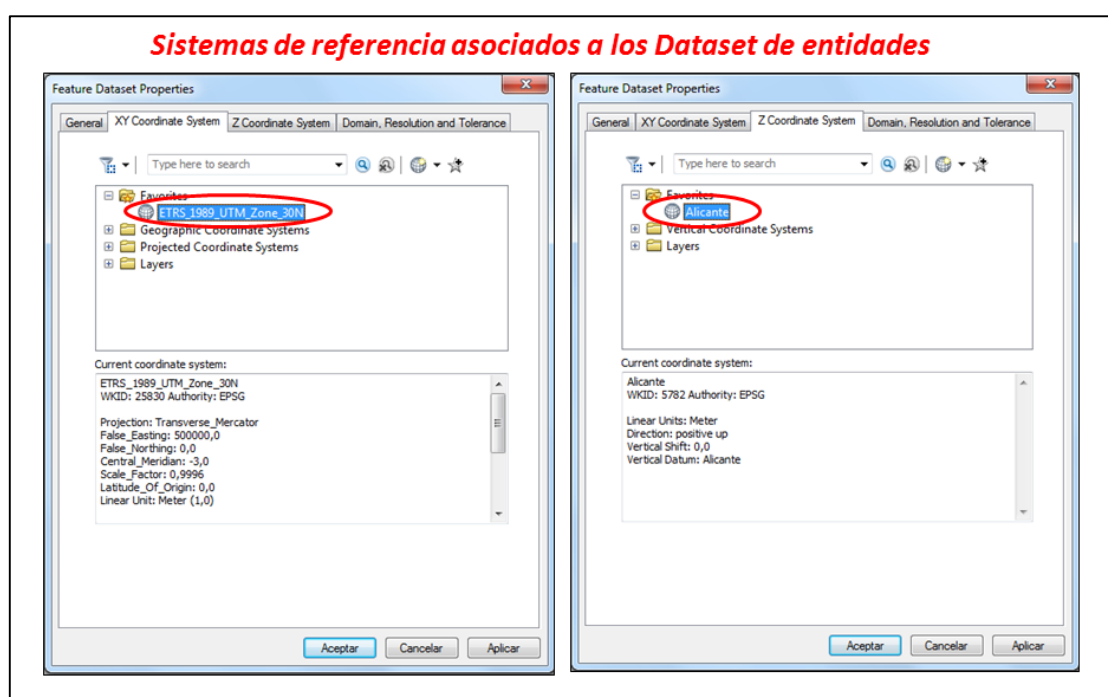


Figura 92. *Sistemas de referencia asociados a la cartografía del proyecto.*
Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

La cartografía oficial española ha consensado referir la información geográfica con proyección UTM, que según Peña (2006) “es el sistema de coordenadas más usual y conveniente utilizado por los S.I.G. Además de considerarlo el más adecuado, añade que es apropiado porque “se diseña para un error de escala que no exceda del 0.1% dentro de cada zona”. Por su parte Olaya (2011) afirma que “en la actualidad, una de las proyecciones más extendidas en todos los ámbitos es la proyección universal transversa de Mercator”. Añade, y coincidiendo con Peña (2006), Bernabé & López (2012) que “La proyección UTM que es el más usado en los SIG y en las IDE”.

Al final, toda la información geográfica integrada debe compartir un solo sistema de referencia, tanto geográfico o geodésico como proyectado para lograr establecer correspondencia lógica espacial y proveer un mecanismo

sólido y consistente al posterior análisis espacial y geoprocésamiento que quiera implementarse.

El software elegido realiza una operación común denominada georreferenciación “al vuelo”, sin embargo, esta operación es temporal y se guarda en la vista actual y configuración de ArcMap como gestor de visualización, despliegue y manipulación directa de información geográfica. No obstante lo anterior, hay que cuidar guardar toda la información en la GDB con los sistemas de referencia específicos y oficiales.

A continuación, se ilustra la zona UTM correspondiente para España, donde se puede apreciar que se utilizan dos zonas (30 y 31), correspondiendo para la referencia cartográfica de la subcuenca del río Adaja exclusivamente la zona 30.

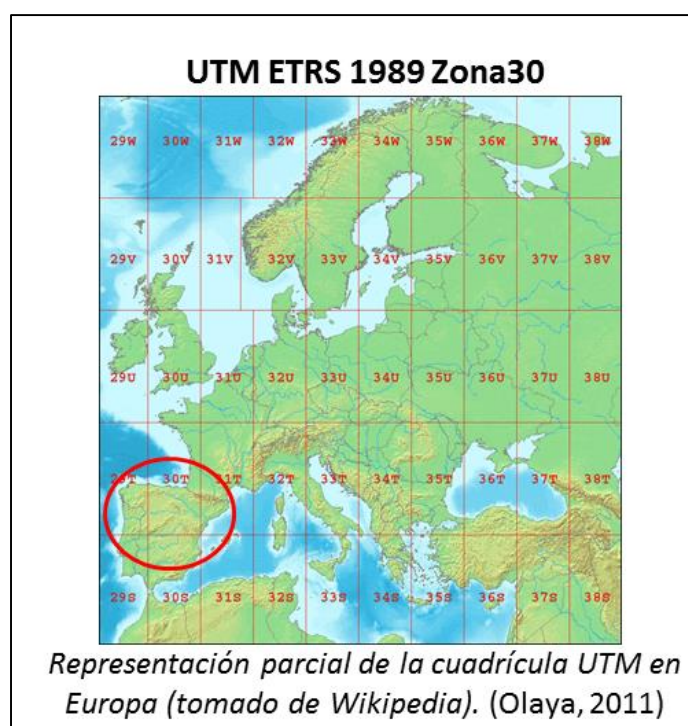


Figura 93. Zonas del sistema de referencia UTM ETRS 1989. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

7.5. Definición de la estructura de la base de datos geográfica y el modelo de datos

Para el presente proyecto se utiliza un gestor de bases de datos geográfica relacional. Los datos han de almacenarse en una Base de Datos Geográfica con extensión (.gdb). Al interior de ella, las capas están organizadas por temáticas en datasets de entidades o clase de entidad que contienen a su vez la representación de objetos, por capas independientes, de tipo puntal, lineal y poligonal. Cada objeto de una clase o entidad contiene sus respectivos atributos o características asociadas e inherentes (instancias de la clase de entidad).

Poner, configurar y disponer la información en este formato favorece la posterior validación de reglas topológicas, tanto al interior de una sola capa como en la conjugación de varias para generar consistencia lógica.

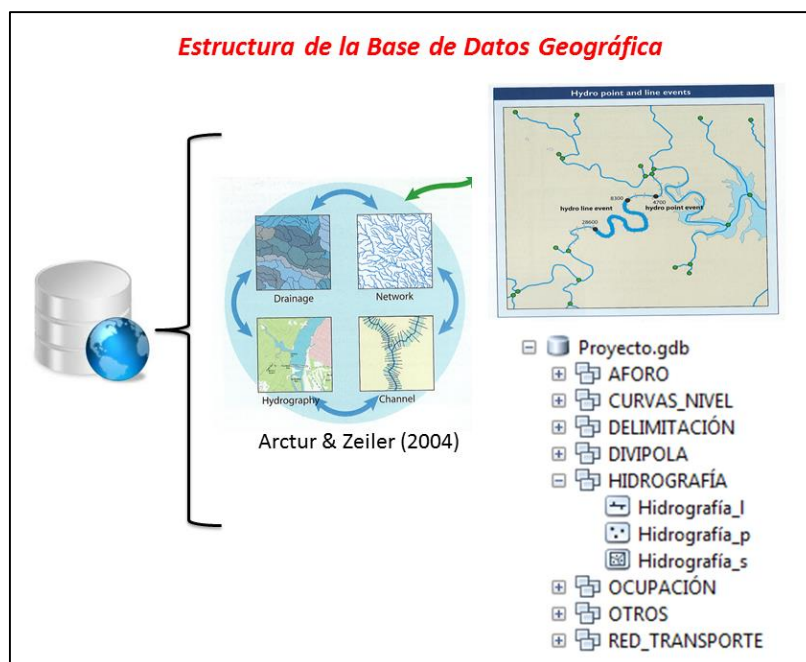


Figura 94. Estructura de la BDG del proyecto. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Peña (2006) afirma que “no hay un único procedimiento correcto que se ajuste para cualquier diseño de bases de datos, el procedimiento a perfilar se trata más bien de una pauta a seguir”, por lo que siguiendo este orden de ideas aquí se ha definido seguir esta pauta, y no solo se ha elegido el modelo relacional como el modelo a implementar porque, además de que ya viene implementado en cartografía utilizado, es habitualmente el modelo más utilizado y práctico.

Constata Olaya (2011) que “las bases de datos relacionales constituyen el modelo de bases de datos más utilizado en la actualidad, es fácil de utilizar para el análisis y la consulta de los datos”, donde es característico la asociación de tablas alfanuméricas a los elementos espaciales y/o geográficos con el propósito de enlazar sus respectivos atributos y/o propiedades inherentes.

A continuación, Olaya (2011) ilustra las características principales del modelo relacional o entidad – relación:

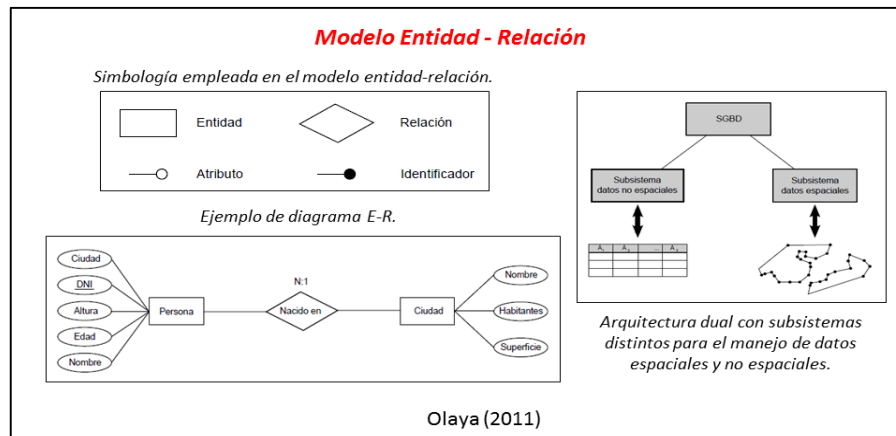


Figura 95. Fundamentos teóricos del Modelo Entidad - Relación. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Afirma Olaya (2011) que este modelo “presenta algunas limitaciones semánticas, y no es suficiente para expresar con detalle la estructura de algunos tipos de información”, no obstante, lo anterior es apropiado para lograr alcanzar los objetivos propuestos. Algunas representaciones cartográficas pueden requerir modelos más complejos que, no solo consideren atributos y tablas relacionales, sino que requieran de la configuración de comportamientos para lograr respuestas de tipo SIG en tiempo real, por ejemplo. De ahí surge un modelo de datos más elaborado como lo es el modelo de datos orientado a objetos.

Por su parte Tomlinson (2011) sugiere una clasificación de modelos en tres (3) categorías o niveles de complejidad y/o especificidad: “Modelo de datos relacionales; Modelo de datos orientado a objetos; Modelo de objetos orientado a datos relacionales”. De igual manera, sugiere utilizar el modelo de datos orientado a objetos para realizar análisis complejo de elementos de recursos naturales en una gran hoja hidrográfica, y el modelo relacional para realizar inventario forestal de árboles, ríos y caminos para análisis de explotación forestal.

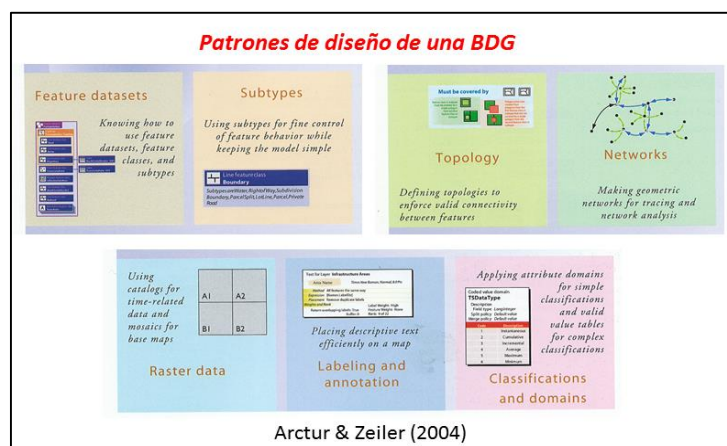


Figura 96. Patrones de diseño de una BDG. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

7.6. Definición de las propiedades espaciales de los datos

Básicamente comprende la revisión topológica de la cartografía vectorial consultada y extraída de las distintas fuentes. Aunque no se consideró dentro del alcance del proyecto la revisión exhaustiva de los geodatos vectoriales ni su posterior edición para generar consistencia lógica al sistema, si es importante mencionar las principales reglas topológicas a tener en cuenta así como la importancia de la misma que, junto con la estructuración, proveen un mayor acercamiento a la explicación de los fenómenos que ocurren en el mundo real a través del análisis espacial y el geoprocésamiento en la producción de cartografía derivada como apoyo en la toma de decisiones futuras.

La topología es un aspecto importante para conseguir integridad y consistencia lógica en los análisis SIG y, *"no solo almacena cada característica individual, sino que también almacena la forma en que las características se relacionan con otras de igual o diferente clase"*. (Bernabé & López, 2012). Por consiguiente, Tomlinson (2007) afirma que la creación de datos topológicamente correctos *"fue un gran avance para establecer la precisión de una base de datos SIG"*. Es una muy buena estrategia para identificar errores en la estructura de vectores en la BDG.

Autores de prestigiosa trayectoria enseñan las principales reglas topológicas a tener en cuenta en la estructuración de un modelo de datos hidrológico:

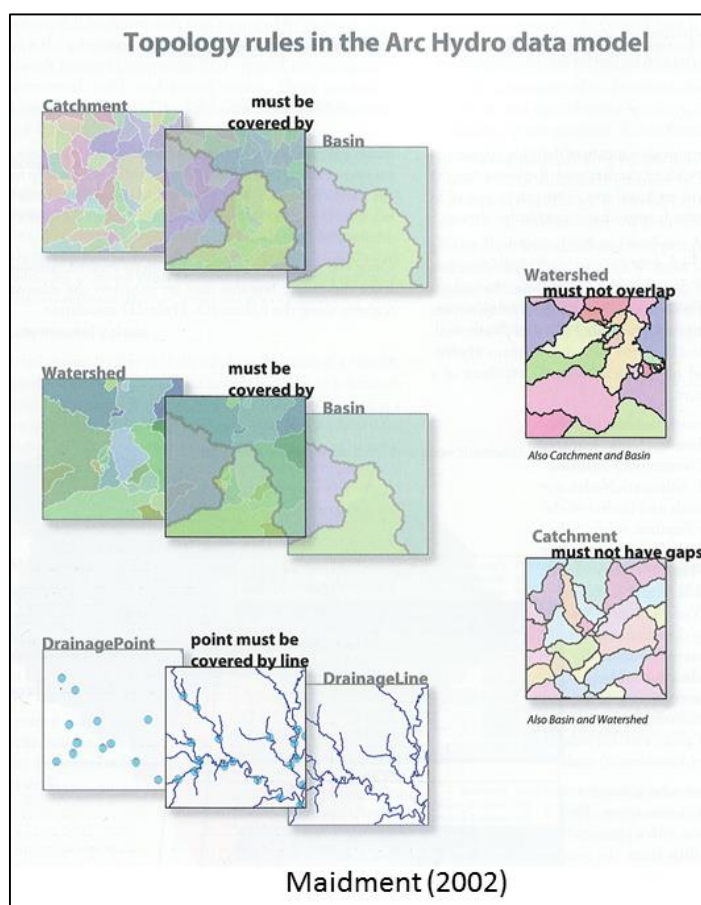


Figura 97. Reglas topológicas.

Adicional a la consideración topológica de la cartografía vectorial, dentro de la definición de las propiedades espaciales de los datos geográficos, a manera de desarrollos futuros, es importante considerar incluir subtipos y dominios.

Los subtipos son propiedades que se asocian a las capas de información geográfica vectorial al interior de una BDG, a través de sus atributos, que asignan, de manera permanente, una reclasificación por único valor.

Los dominios son propiedades que se asocian a los campos de atributos de las capas con el propósito de adicionar una restricción en el rango de valores que puede admitir dicho campo y, que puede ser muy útil en el momento de la edición de los mismos, controlando posibles errores que puedan alterar el resultado de futuros análisis.

7.7. Diseño y gestión de la base de datos geográfica

El diseño preliminar de la BDG incluye las siguientes capas organizadas en datasets de entidades, como ilustra la siguiente figura:

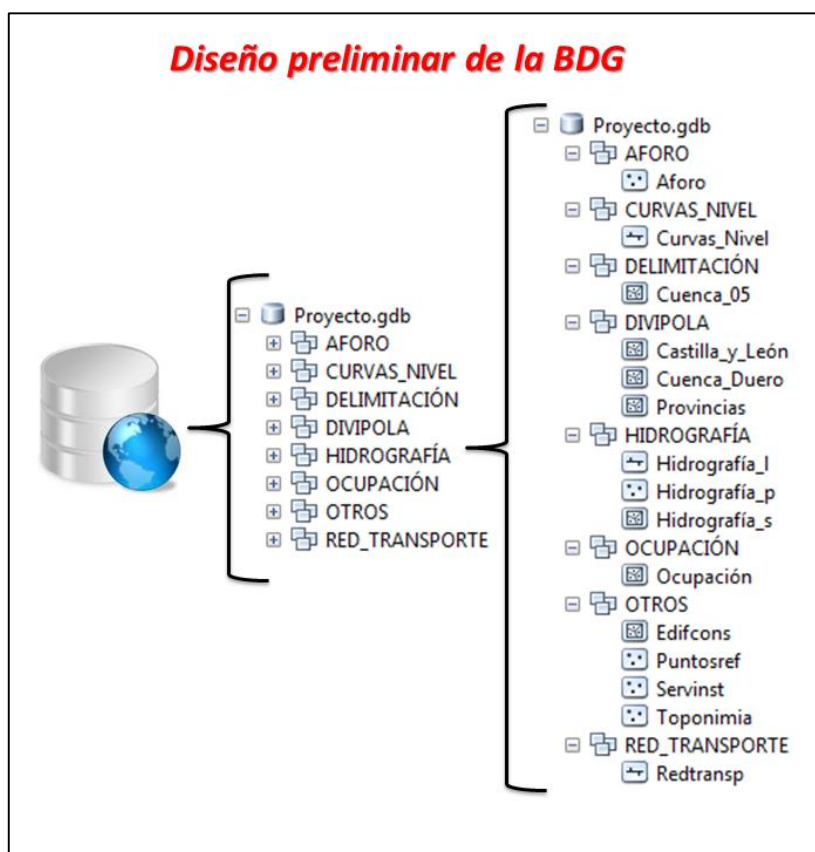


Figura 98. *Diseño preliminar de la BDG del proyecto. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.*

Cada una de las capas con información geográfica de tipo vectorial lleva consigo asociada una tabla de atributos con información alfanumérica. A continuación se ilustra dicha componente junto a los atributos que acompañan los registros de las capas vectoriales en las distintas geometrías:

AFORO (Dataset de entidad tipo vector)

- Punto de confluencia (Aforo)

Esta capa de tipo punto contiene un solo registro correspondiente al punto de aforo elegido como referencia para la delimitación de la cuenca de drenaje de la subcuenca del río Adaja.

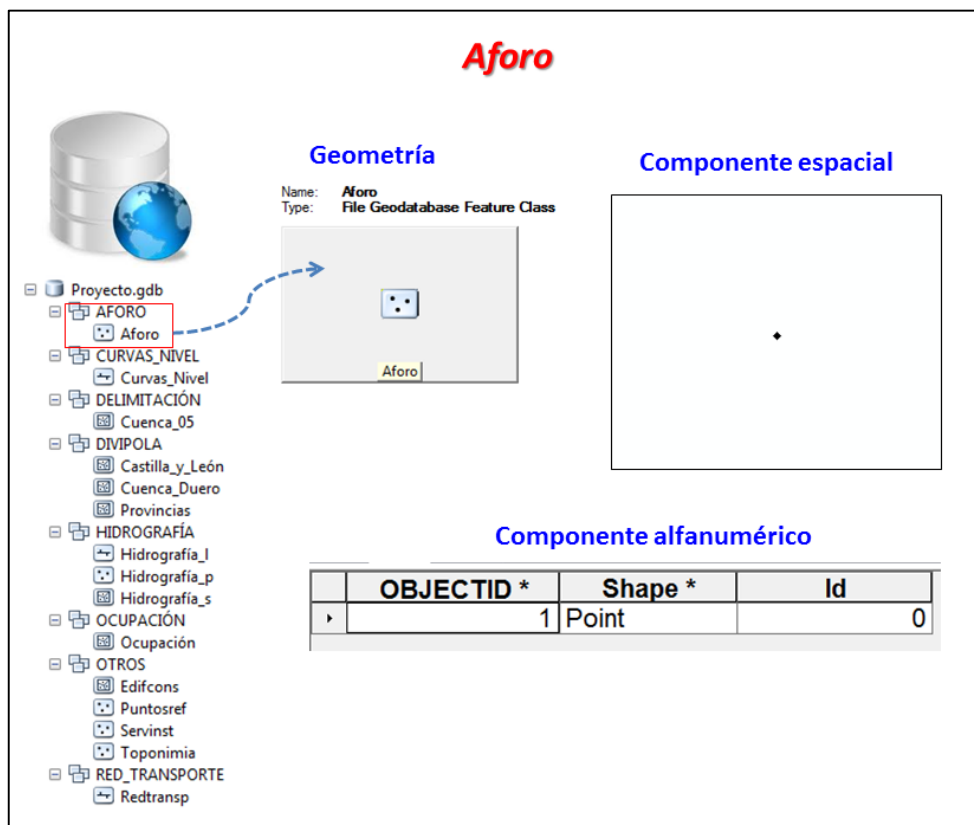


Figura 99. Componente espacial y alfanumérica de la capa “aforo”. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Dicho punto corresponde a la localización del punto de confluencia o punto de aforo o punto de obra, localizado justo en el lugar donde el río Adaja vierte sus aguas en el río Duero.

CURVAS NIVEL (Dataset de entidad tipo vector)

- Curvas de Nivel (Curvas_Nivel)

Esta capa de tipo lineal contiene 88.812 registros correspondientes a la descripción de la topografía del terreno mediante las curvas de nivel. Tiene asociados atributos inherentes a la geometría tales como longitud, así como otros asociados correspondientes a una codificación TTGGSS (Tipo, Grupo, Subgrupo), cota con el valor de la altitud sobre el nivel medio del mar y un significado que describe el tipo de curva de nivel.

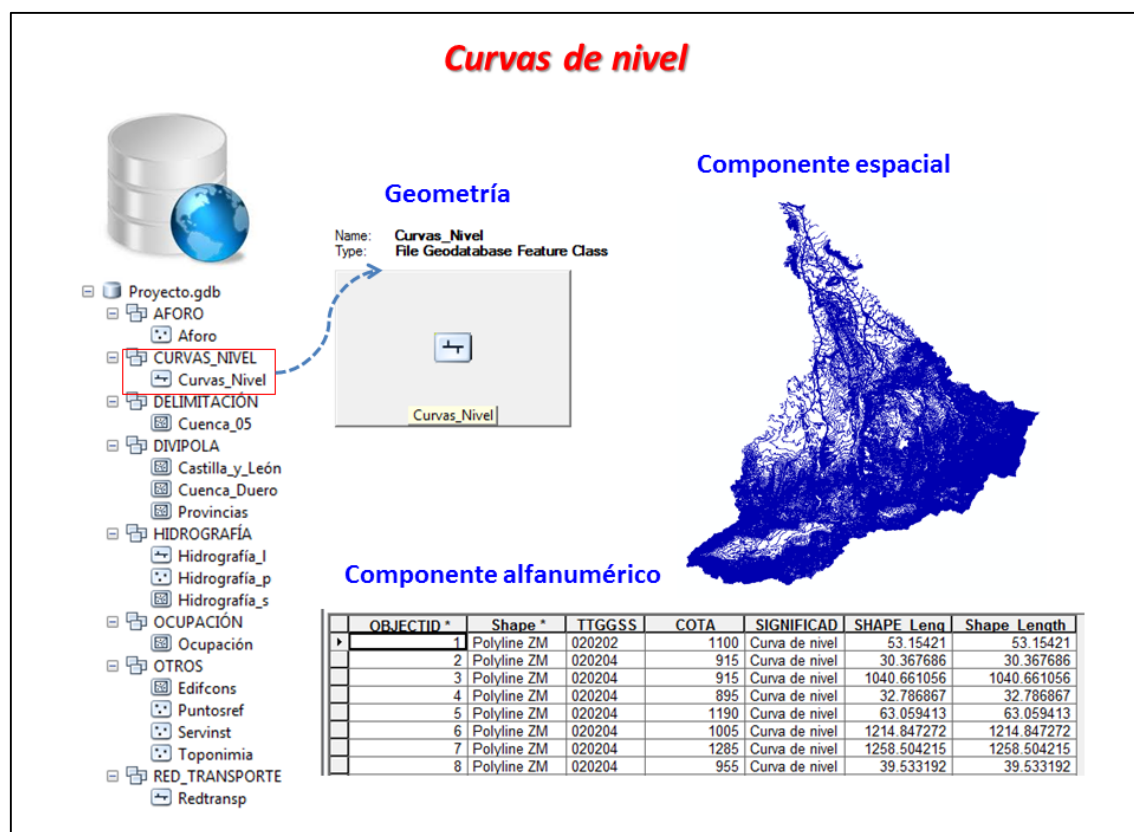


Figura 100. Componente espacial y alfanumérica de la capa “curvas de nivel”.
Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

DELIMITACIÓN (Dataset de entidad tipo vector)

- Delimitación de la zona de estudio (Cuenca_05)

Esta capa de tipo poligonal contiene un solo registro correspondiente a la delimitación final de la subcuenca del río Adaja, obtenida a partir del procesamiento del MDE de 5x5 metros de resolución espacial.

Tiene asociados atributos inherentes a la geometría tales como área y perímetro, así como otros asociados correspondientes a las coordenadas geográficas y proyectadas UTM que se corresponden con el centroide del polígono.

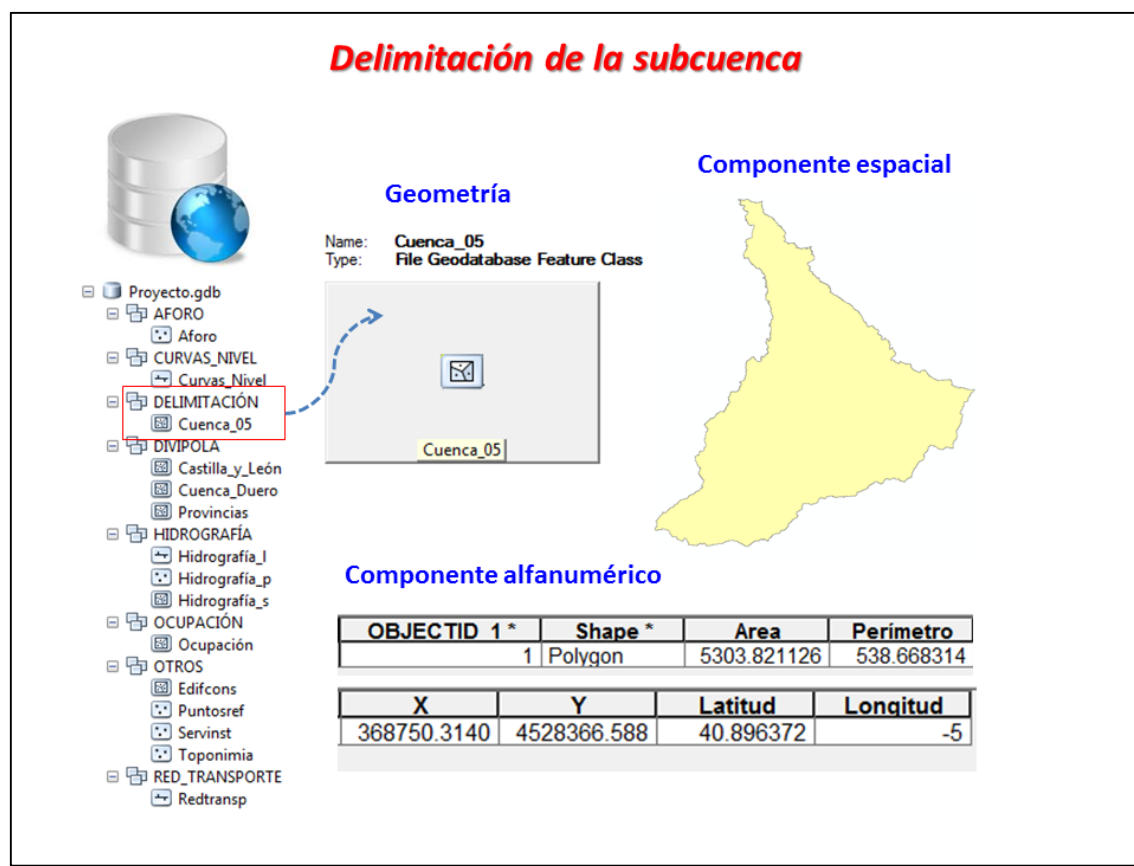


Figura 101. Componente espacial y alfanumérica de la capa “delimitación de la subcuenca”. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

DIVIPOLA (Dataset de entidad tipo vector)

- Castilla y León (Castilla_y_León)
- Cuenca del Duero (Cuenca_Duero)
- Provincias (Provincias)

Estas capas de tipo poligonal contienen los siguientes registros: Castilla y León un solo registro correspondiente a la delimitación político administrativa de la comunidad autónoma de Castilla y León; un registro para la capa de Cuenca del Duero que indica la demarcación oficial de la cuenca del Duero; tres registros asociados a la capa de Provincial correspondientes a las delimitaciones político administrativas de las provincias de Valladolid, Segovia y Ávila.

Tiene asociados atributos inherentes a la geometría tales como área y perímetro, así como otros asociados correspondientes a nombres de país, comunidad autónoma y provincia, acompañados de una codificación establecida por la autoridad competente.



Figura 102. Componente espacial y alfanumérica de las capas “división política administrativa”. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

HIDROGRAFÍA (Dataset de entidad tipo vector)

- Hidrografía Puntual (Hidrografía_p)
- Hidrografía Lineal (Hidrografía_l)
- Hidrografía Superficial (Hidrografía_s)

Estas capas de tipo puntual, lineal y poligonal contienen los siguientes registros: la hidrografía puntual contiene 1.711 registros; la hidrografía superficial contiene 29.672 registros; la hidrografía superficial contiene 14 registros.

Tiene asociados atributos inherentes a la geometría tales como área y perímetro para la capa con geometría superficial, así como otros asociados correspondientes a nombre o descripción del tipo de registro, código de demarcación y código TTGGSS.

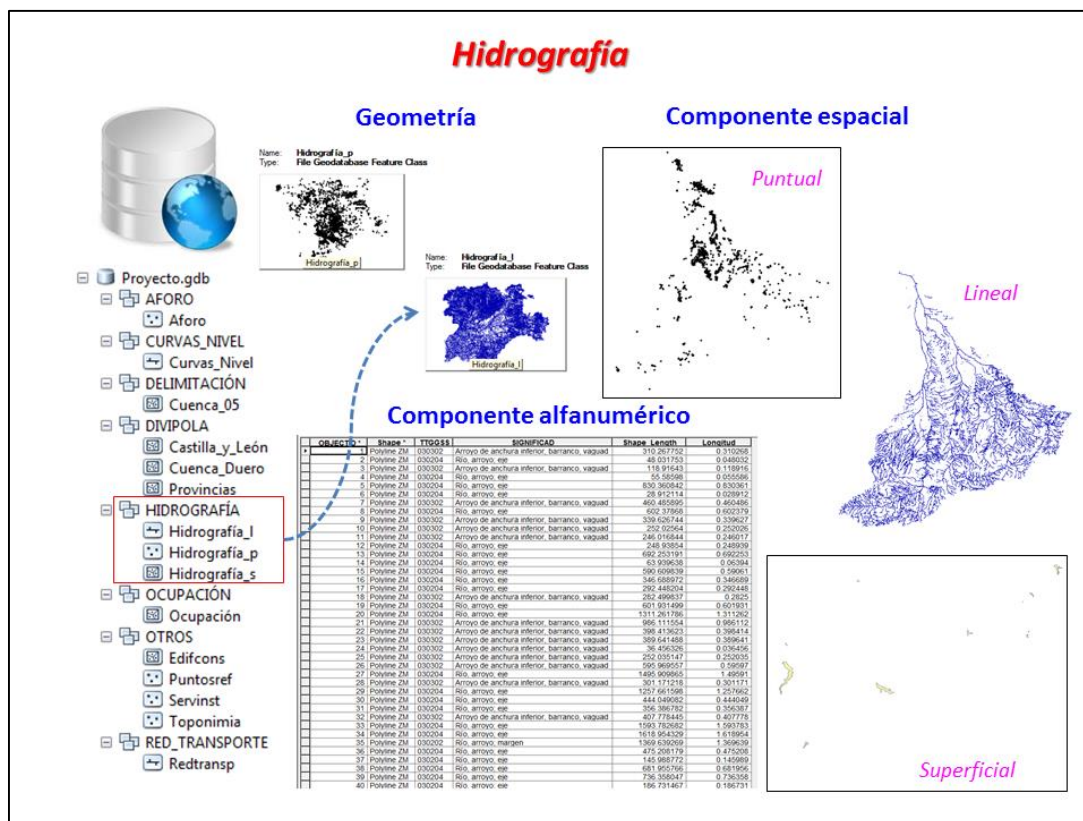


Figura 103. Componente espacial y alfanumérica de las capas “hidrografía”. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

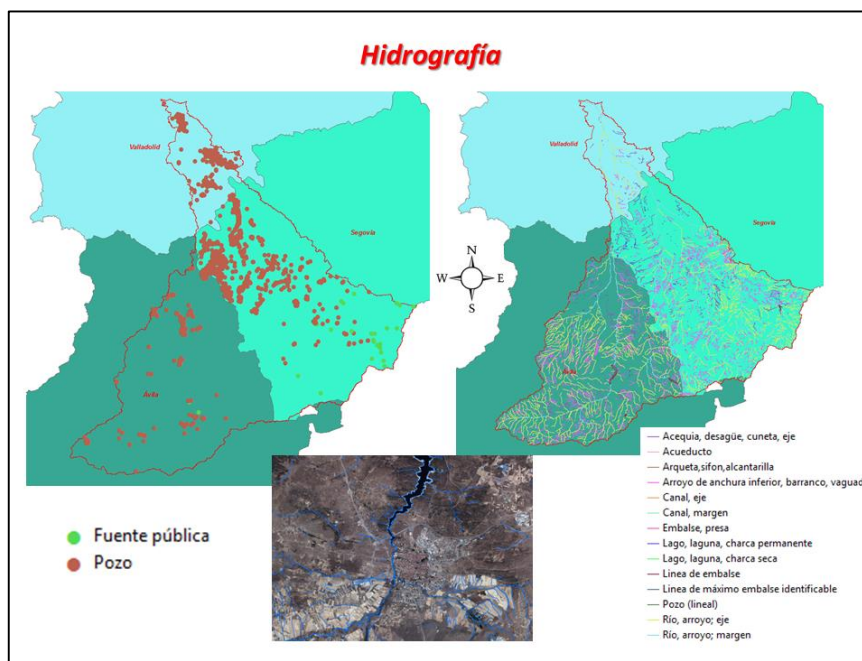


Figura 104. Vista gráfica de la hidrografía de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

OCUPACIÓN (Dataset de entidad tipo vector)

- Ocupación del Suelo (Ocupación)

Esta capa de tipo poligonal contiene 13.424 registros correspondientes a las distintas unidades superficiales de la ocupación del suelo en la subcuenca elaborada por el SIOSE con vigencia 2011.

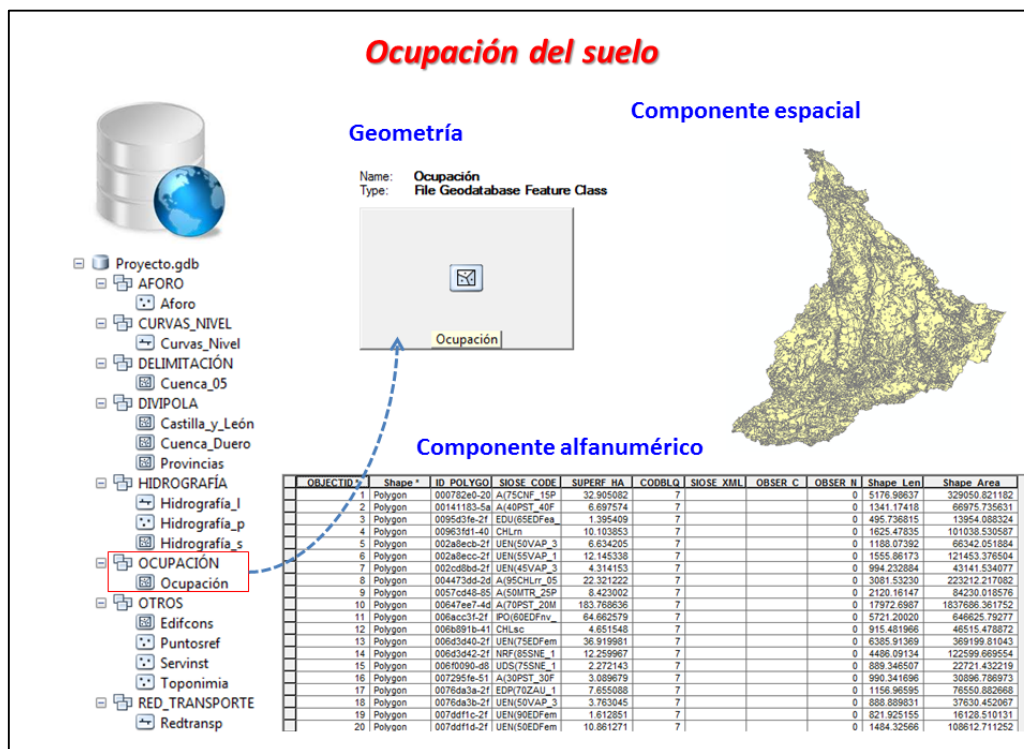


Figura 105. Componente espacial y alfanumérica de la capa "ocupación del suelo". Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

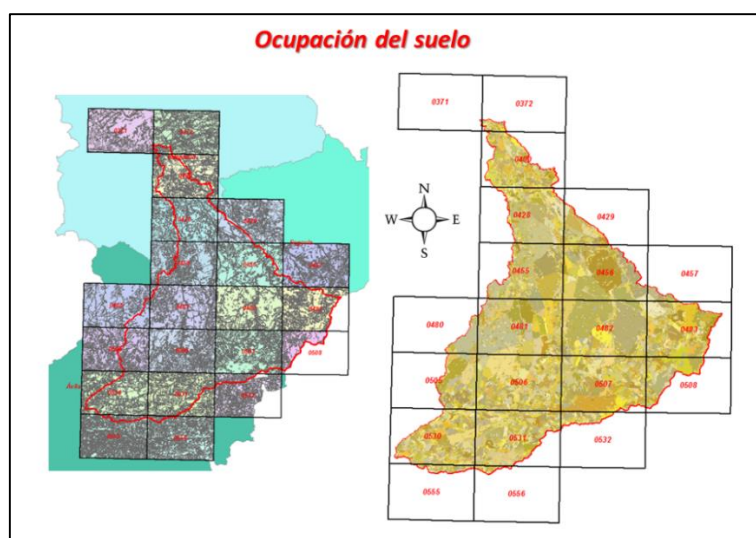


Figura 106. Vista gráfica de la ocupación del suelo de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

OTROS (Dataset de entidad tipo vector)

- Edificios y construcciones (Edifcons)
- Puntos de referencia (Puntosref)
- Instalaciones y servicios (Servinst)
- Topónimos (Toponimia)

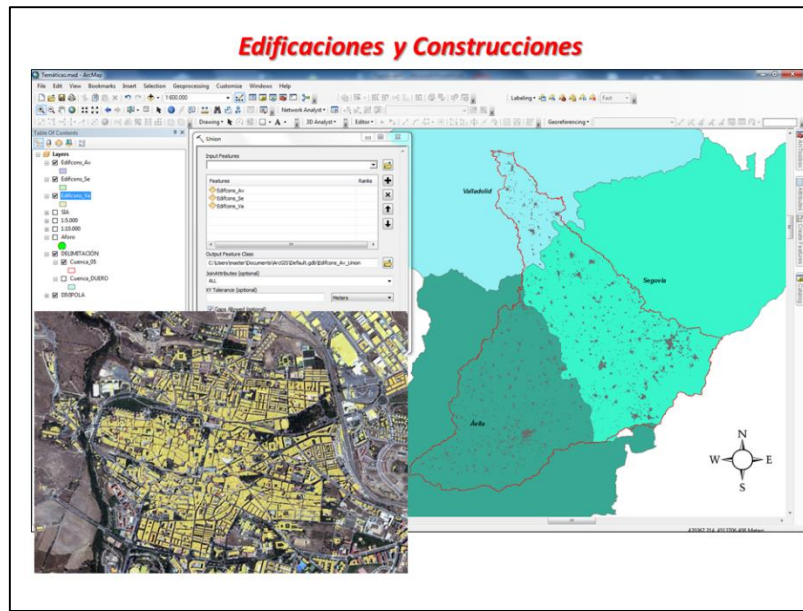


Figura 107. Vista gráfica de edificaciones y construcciones de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

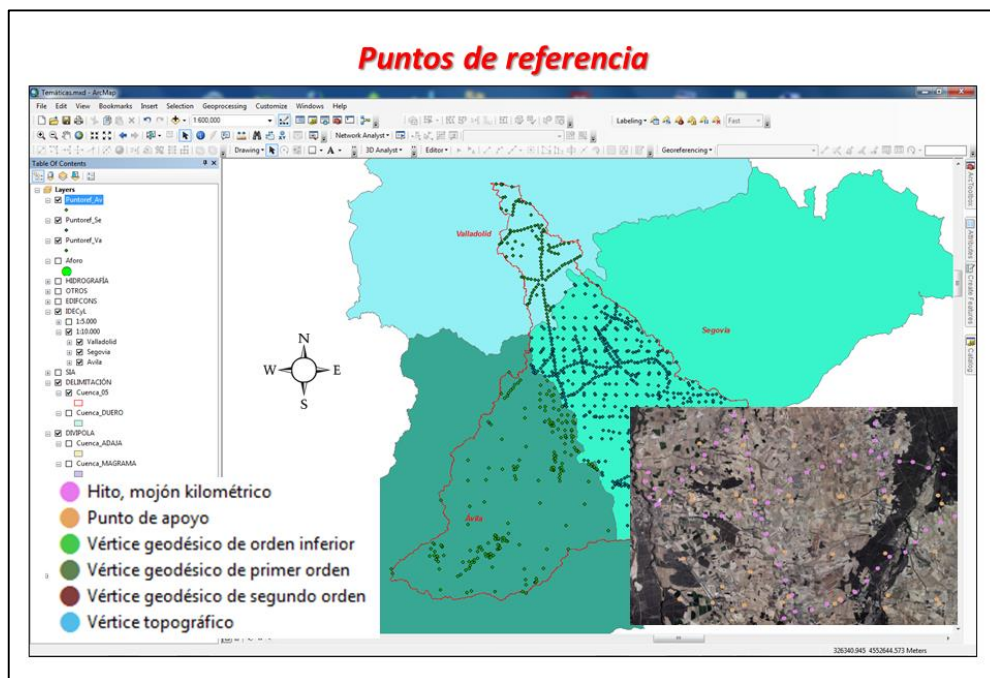


Figura 108. Vista gráfica de puntos de referencia de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

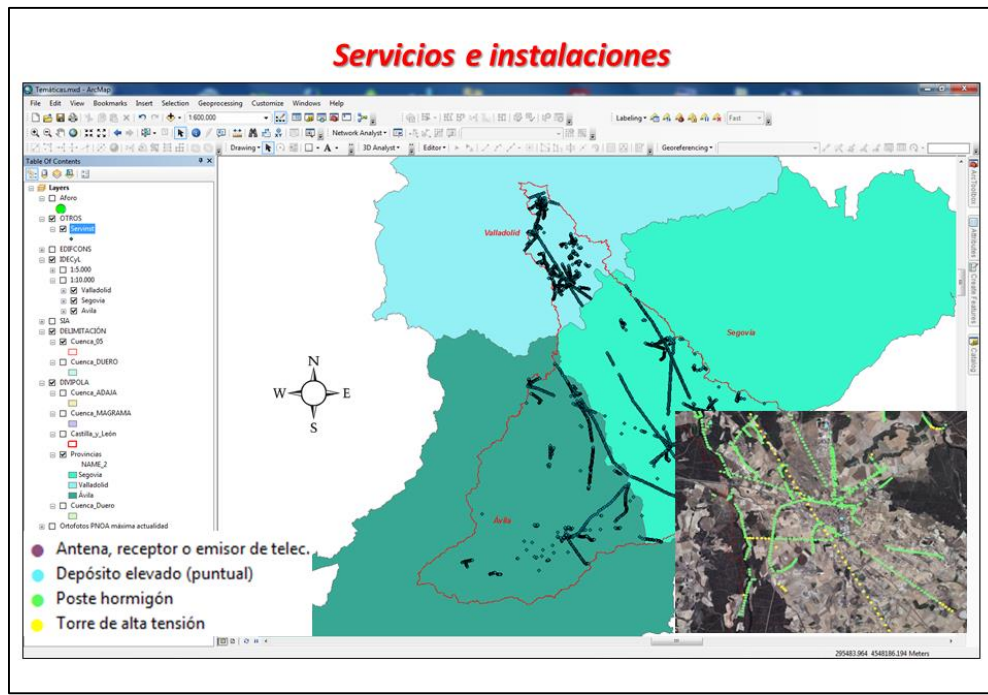


Figura 109. Vista gráfica de servicios e instalaciones de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

RED TRANSPORTE (Dataset de entidad tipo vector)

- Red de transporte (Redtransp)

Esta capa de tipo lineal contiene 109.812 registros correspondientes a las distintas representaciones lineales de vías en distintos órdenes tanto central como de borde, redes ferroviarias, caminos, etc.

Tiene asociados atributos inherentes a la geometría tales como longitud de línea, así como otros asociados correspondientes a nombre o descripción del tipo de registro y código TTGGSS.

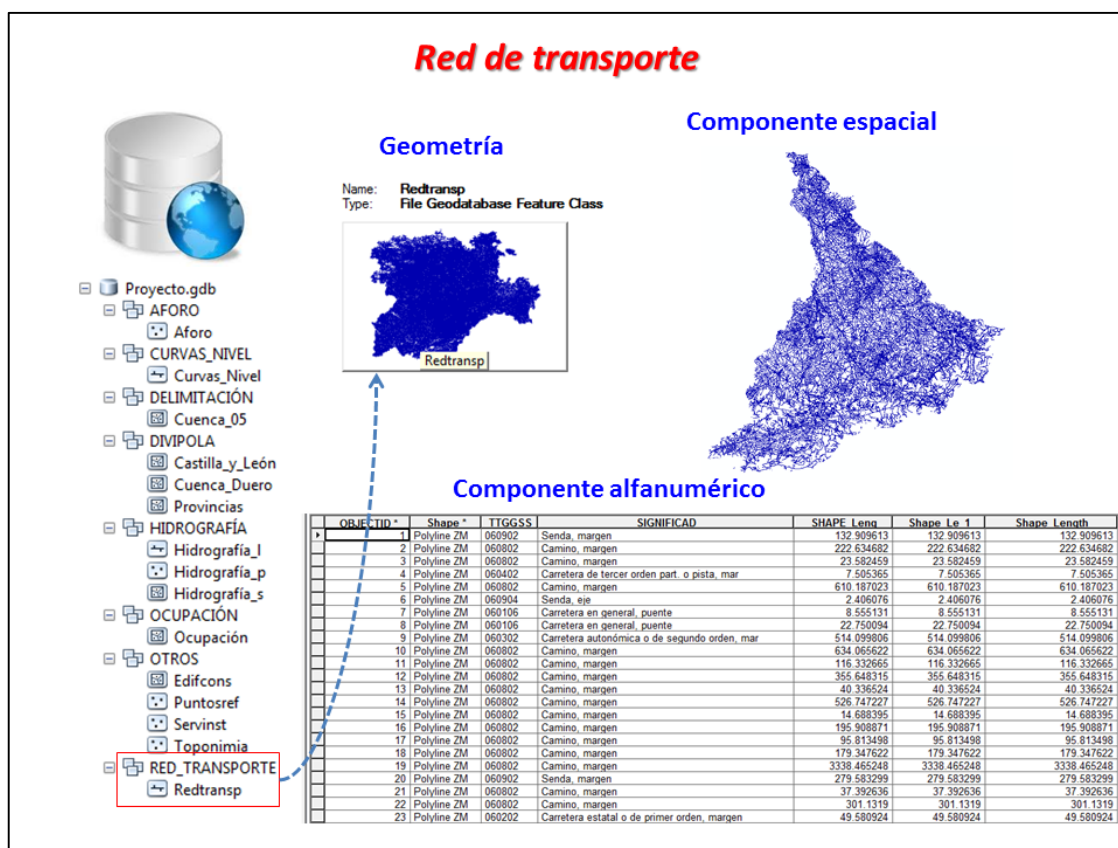


Figura 110. Componente espacial y alfanumérica de la capa “red de transporte”. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

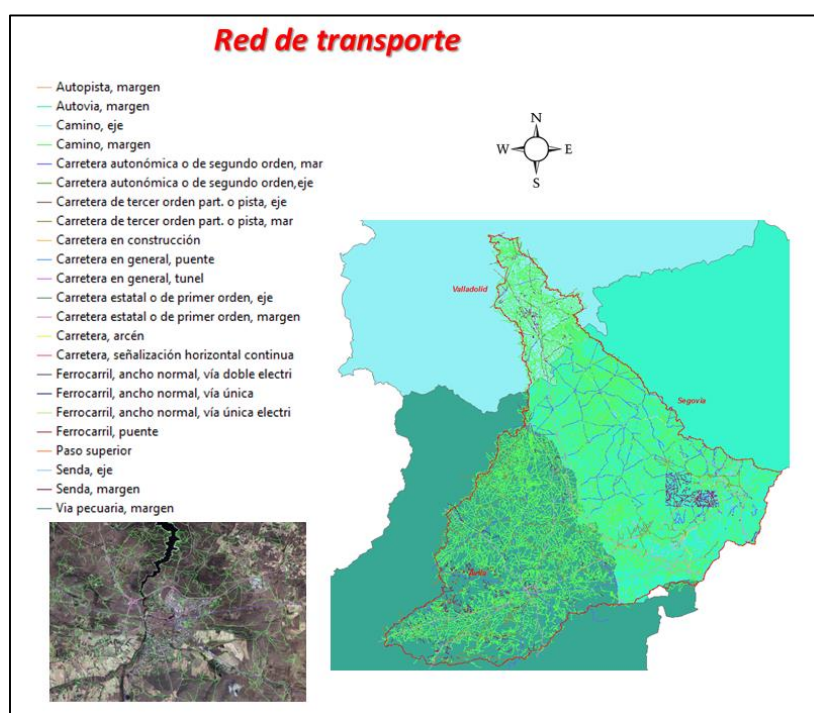


Figura 111. Vista gráfica de la red de transporte de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

La información alfanumérica asociada a la cartografía de tipo ráster, corresponde a las variables almacenadas y representadas por la superficie que ocupa cada una de las celdas o píxeles.

OROGRAFÍA (información tipo ráster)

La orografía, representada por el MDE y todos los productos derivados, representan espacialmente una variable en una superficie de 25 m² dada la resolución espacial de 5x5 metros. Los atributos e información alfanumérica asociada pueden apreciarse claramente en las respectivas leyendas reclasificadas que acompañan cada temática en el capítulo de resultados.

GEOLOGÍA (información tipo ráster)

La geología y edafología cuya fuente es la CHD, muestran de manera directa las respectivas leyendas con los significados de cada unidad. La fuente del IGME correspondiente a la cartografía geológica MAGNA50, debido a la extensión de las mismas, se han considerado como anexos complementarios para futuras consultas.

CLIMATOLOGÍA (información tipo ráster)

De igual manera, la información geográfica ráster que destaca los principales aspectos climáticos de la subcuenca contiene su respectiva leyenda que facilita su interpretación.

Procesos futuros deben procurar realizar la conversión de algunas capas de información tipo ráster a vector. Ello deberá ser de importancia significativa en una futura aplicación SIG que requiera derivar insumos cartográficos útiles en la toma de decisión, como la identificación y elección de lugares apropiados para el emplazamiento de locaciones de interés ambiental e hidrológico sostenible, entre otros.

8. RESULTADOS

De manera general los resultados comprenden una caracterización descriptiva de los principales aspectos físicos de la subcuenca en relación a las temáticas de referencia almacenados en una GDB con cartografía digital a distintas escalas, y una serie de mapas digitales y análogos.

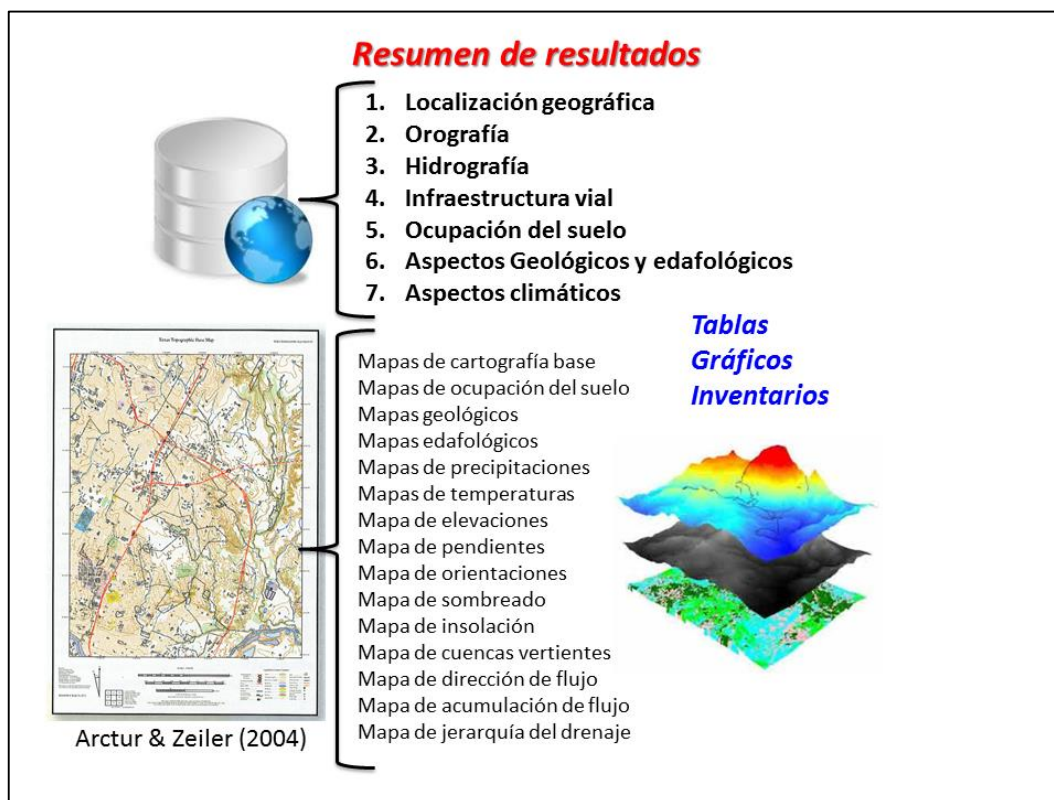


Figura 112. Resumen de resultados. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

El presente capítulo contiene los resultados obtenidos mediante el desarrollo de los procesos metodológicos realizados y, que conjuntamente, constituyen una caracterización física superficial de la subcuenca del río Adaja desde la perspectiva de las siete (7) temáticas trabajadas, y sus posteriores configuraciones en mapas de salida final, que se agrupan en once (11) desarrollos específicos cuyo orden de presentación se corresponde con:

1. Delimitación de la zona de estudio.
2. Orografía (elevaciones, pendientes, orientaciones y sombreado)
3. Cuencas vertientes.
4. Dirección y acumulación de flujo.
5. Red de drenaje y jerarquía.
6. Hidrografía.
7. Infraestructura vial.
8. Ocupación del suelo.
9. Aspectos geológicos y edafológicos.
10. Aspectos climáticos.
11. Diseño de plantillas y salidas gráficas finales.

Los ítems 1 al 5 son productos derivados del MDE de 5 metros de resolución espacial o tamaño de pixel, que representan una caracterización desde el formato de datos ráster.

Los ítems 6, 7 y 8 corresponden a las temáticas vectoriales susceptibles a procesos de desarrollos futuros de estructuración y adecuación topológica.

Los ítems 9 y 10 corresponden a temáticas ráster en formato de imagen georreferenciada susceptibles a desarrollos futuros de vectorización.

El ítem 11 propone la configuración de 21 mapas: 4 relacionados con la cartografía base; 3 relacionados con cartografía geológica y edafológica; 5 mapas referentes a cartografía climática; 9 mapas relacionados con la orografía y jerarquía del drenaje.

Cada mapa ha de ser desagregado en 21 mapas a escala 1:50.000 más uno general a escala 1:350.000, excepto para las temáticas relacionadas con cuencas vertientes, aspectos geológicos, edafológicos y climáticos que tendrán una representación general a escala 1:350.000.

8.1. Delimitación de la zona de estudio

La subcuenca topográfica del río Adaja se encuentra localizada en la Comunidad Autónoma de Castilla y León, al sureste de la cuenca del Duero, sobre los 4,6 grados de longitud oeste y 40,9 grados de latitud norte, correspondencia plana UTM ETRS 1989 zona 30 N con X = 368.750,31 metros, Y = 4.528.366,58 metros (centroide de la superficie de la subcuenca).

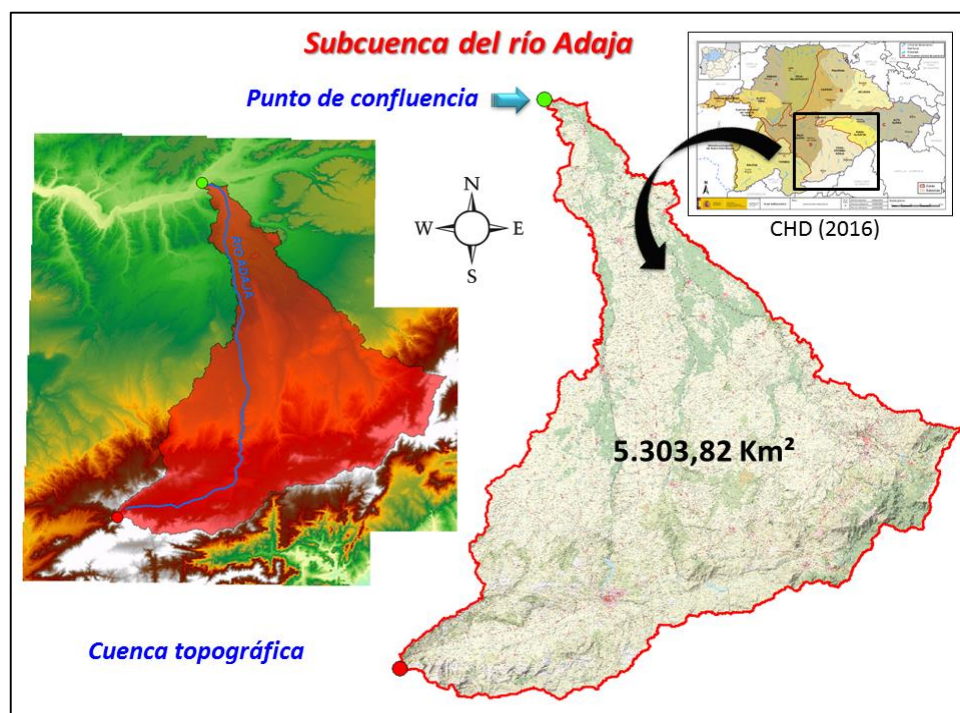


Figura 113. Delimitación de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

La delimitación de la zona de estudio sugiere una ilustración de la localización general y la interrelación con la cuenca hidrográfica del Duero y las comunidades autónomas:

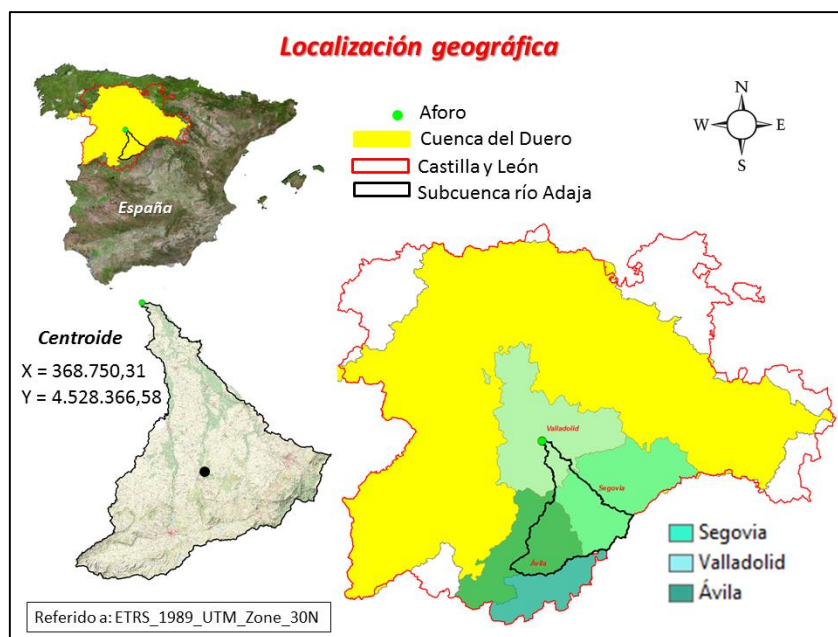


Figura 114. Localización geográfica de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Su superficie abarca parte del territorio de las provincias de Valladolid, Ávila y Segovia, con participaciones en área del 9,16%, 43,43% y 47,41%, respectivamente.

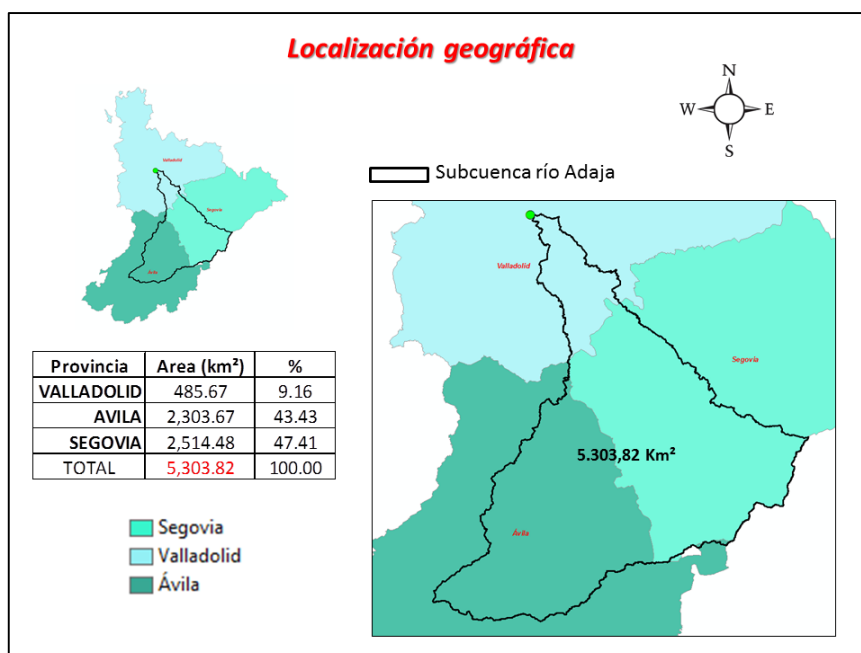


Figura 115. Participación de superficie de la subcuenca en las provincias. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

8.2. Orografía

La orografía se encuentra representada principalmente por las características del relieve en cuanto a elevaciones, pendientes, orientaciones y sombreado. Los aspectos relacionados con la dirección y acumulación de flujo, así como el cálculo de las cuencas vertientes también constituyen referentes característicos de la orografía, cuyos resultados se detallan en ítems posteriores.

Todos en conjunto constituyen productos derivados del MDE de 5x5 metros de resolución espacial, y han sido procesados para la totalidad superficial de la subcuenca del río Adaja.

8.2.1. Elevaciones

La subcuenca topográfica del río Adaja se caracteriza por tener una altitud media con cota correspondiente a los 1.044,9 m.s.n.m. Su topografía oscila entre los 670 y los 2427 m.s.n.m. descendiendo de sur a norte hasta provocar el punto de desagüe en un punto de confluencia localizado en la intersección del cauce del río Adaja con el río Duero.

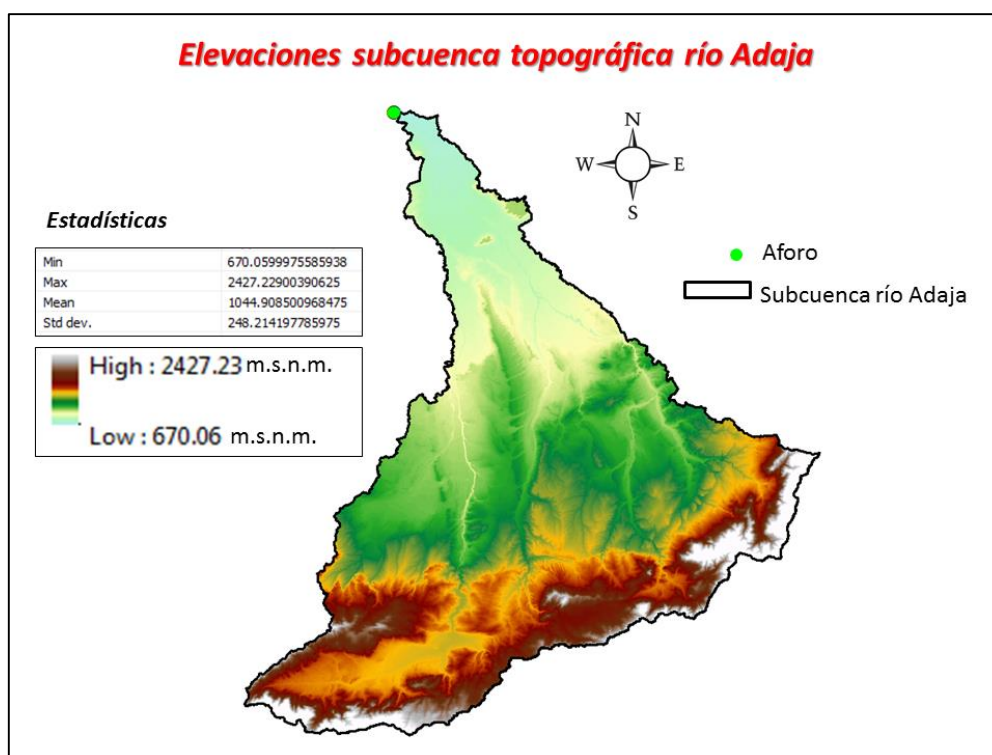


Figura 116. Elevaciones de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Adicionalmente, se ha construido un modelo irregular de triángulos TIN a partir de la triangulación de Delaunay, con el propósito de mostrar facetas más detalladas y atractivas visualmente de la morfología del terreno.

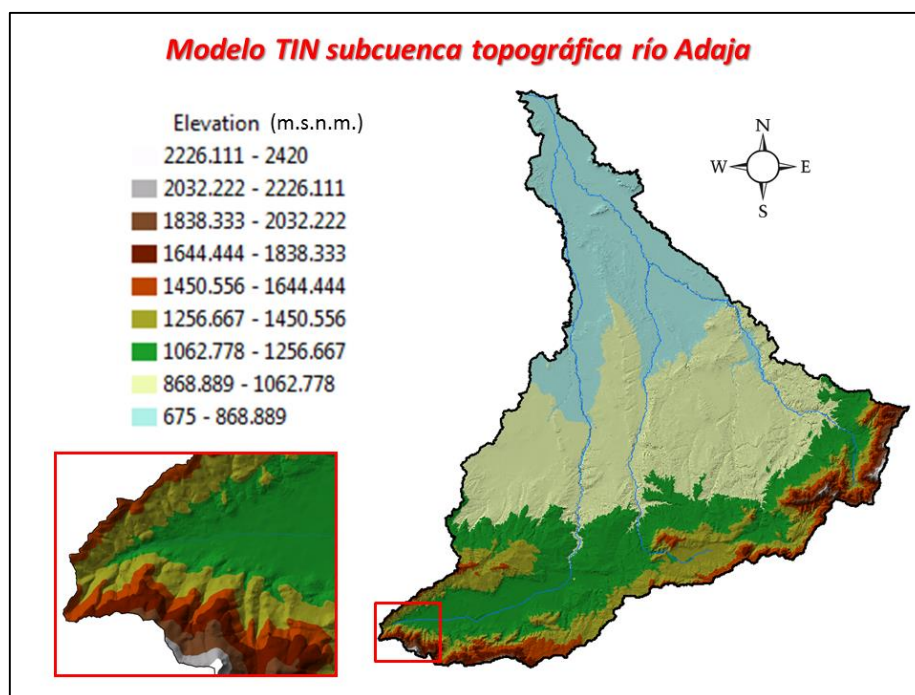


Figura 117. Modelo TIN de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Utilizando procesos básicos de reclasificación ráster, se ha establecido seis (6) rangos, según el criterio literario referenciado en un capítulo anterior (cálculo de la altura media figura 80), con el propósito de analizar por partes el comportamiento de las elevaciones al interior de la subcuenca.

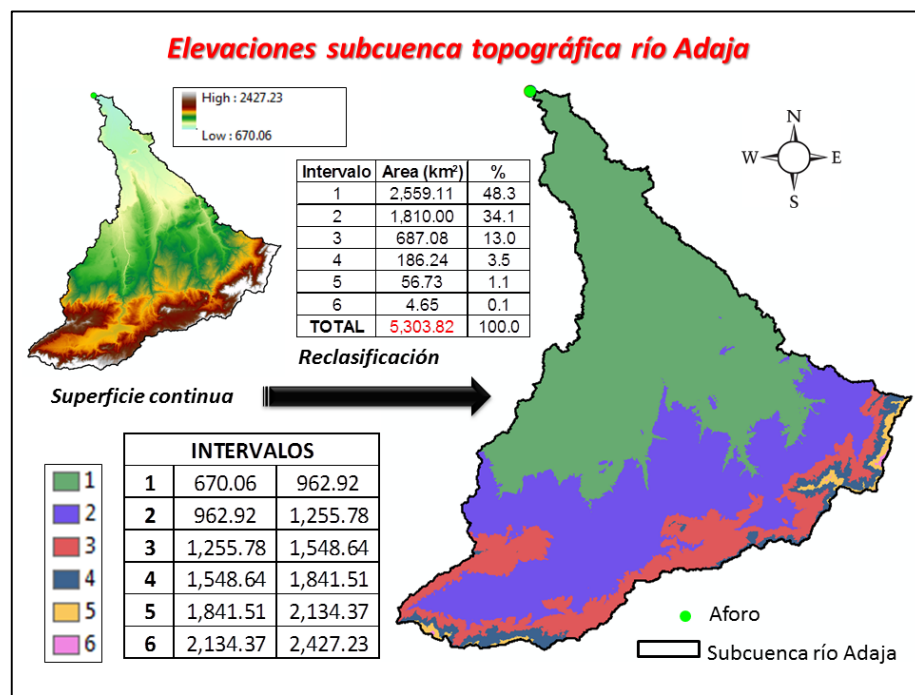


Figura 118. Elevaciones y cálculo de áreas por rangos. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

8.2.2. Pendientes

A continuación, se construyen ficheros ráster con las pendientes de la subcuenca, expresadas en grados sexagesimales y porcentaje.

Las pendientes de la subcuenca oscilan entre los 0 grados y los 84,7 grados tal como se aprecia en la siguiente figura:

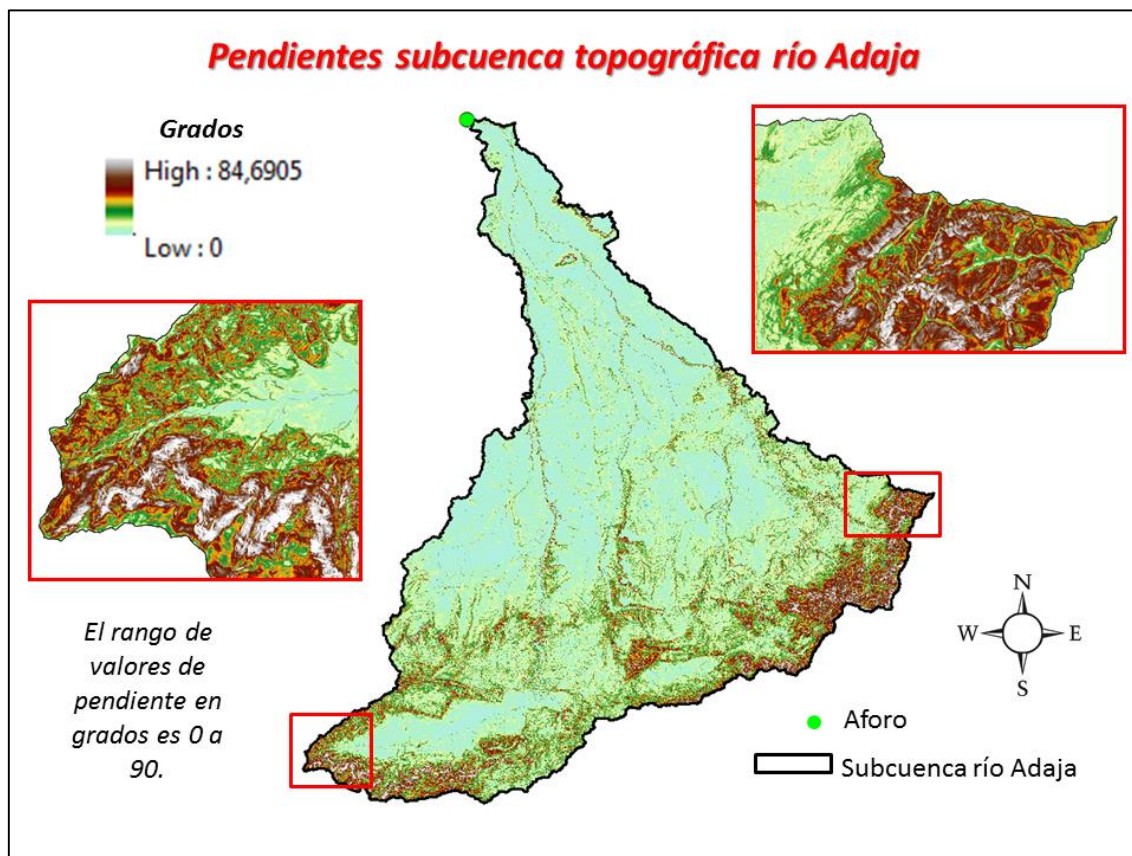


Figura 119. Pendientes de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

De manera complementaria, se construye el fichero ráster de pendientes expresadas en porcentajes, los cuales oscilan entre los 0 por ciento y mayores de 60 por ciento, aplicando una reclasificación supervisada para 10 clases según la FAO (2009).

Las pendientes con mayor representación en la subcuenca se encuentran entre las clases 4, 5 y 6, correspondiente a pendientes que se encuentran entre el 1 y el 10 por ciento, correspondiente a zonas muy ligeramente inclinadas, ligeramente inclinadas e inclinadas según la FAO (2009).

Una breve interpretación del porcentaje de pendiente corresponde a que "una superficie plana es 0 por ciento, una superficie de 45 grados es 100 por ciento y, a medida que la superficie se vuelve más vertical, la elevación en porcentaje se vuelve cada vez mayor". (ESRI, 2016)

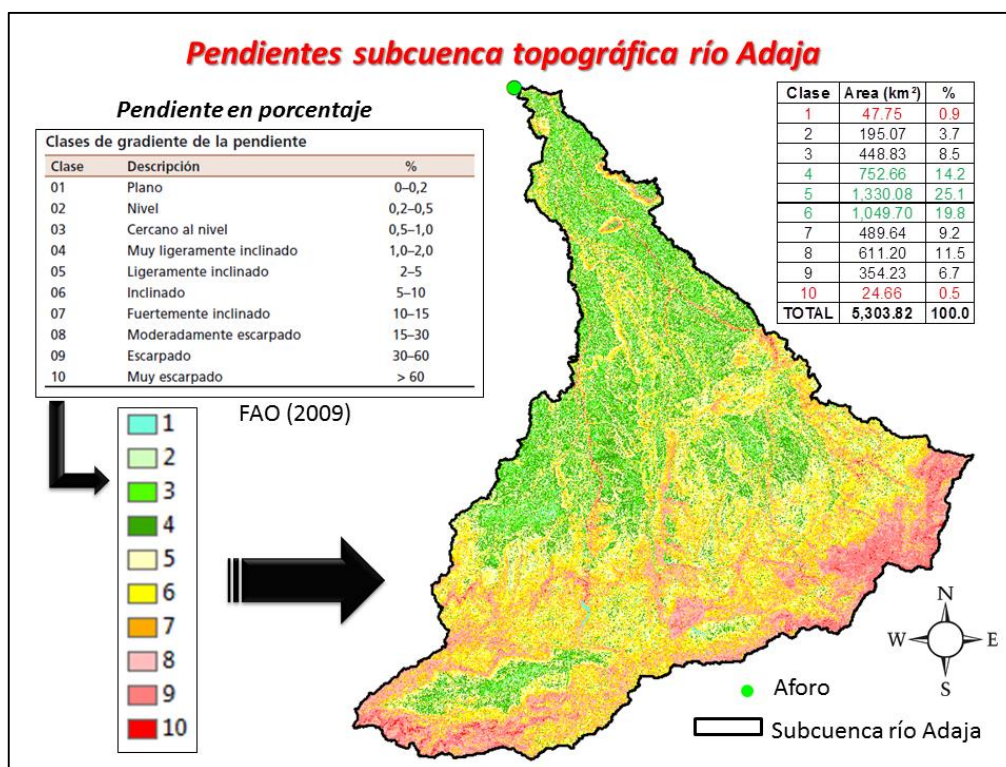


Figura 120. Pendientes y cálculo de áreas por rangos. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

8.2.3. Orientaciones

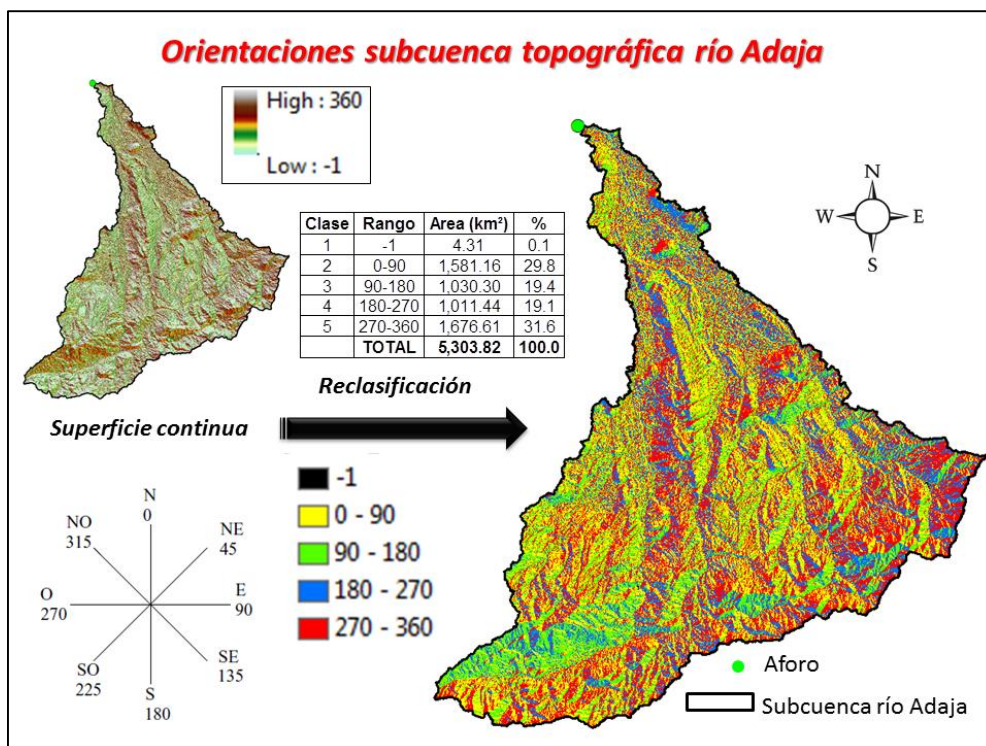


Figura 121. Orientaciones de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

8.2.4. Sombreado

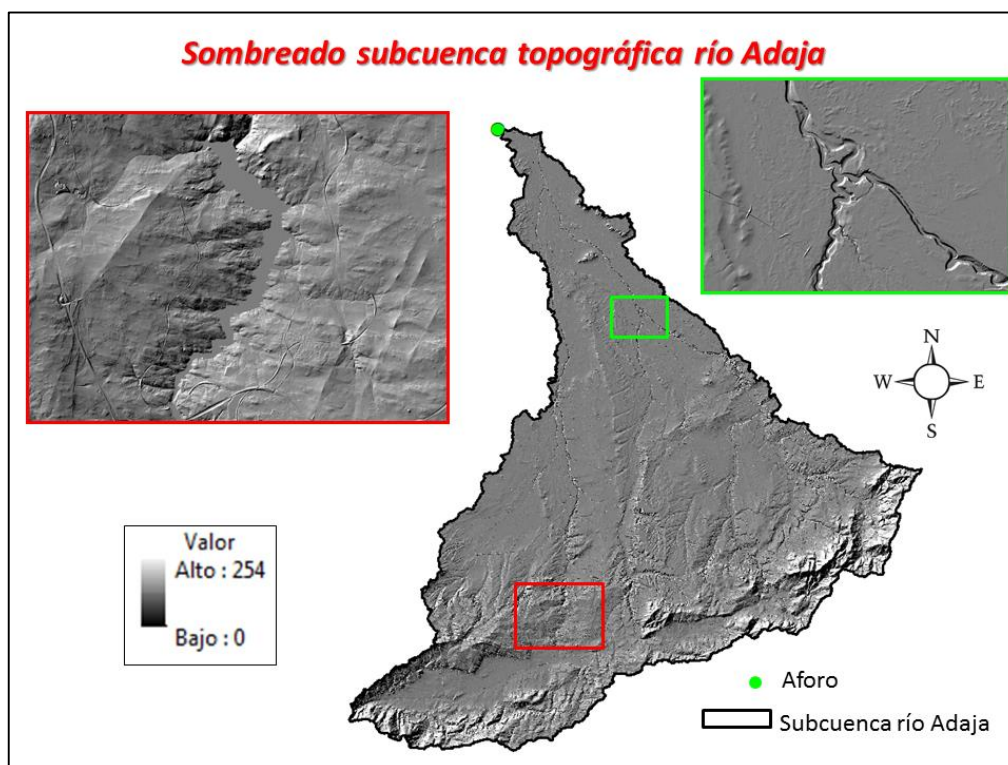


Figura 122. Sombreado de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

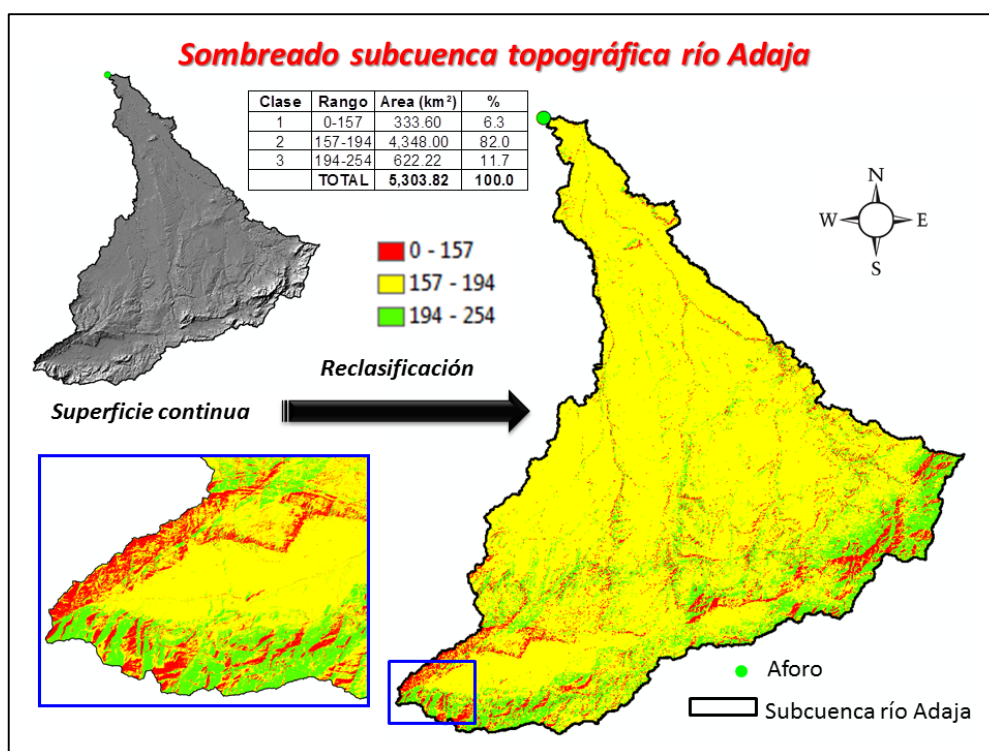


Figura 123. Sombreado y cálculo de áreas por rangos. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

8.3. Cuencas vertientes

Las cuencas vertientes de la subcuenca del río Adaja se localizan en la zona sur desde donde se sitúan las cotas superiores de la misma dando lugar a las líneas divisorias que separan físicamente la cuenca de drenaje natural de los cauces.

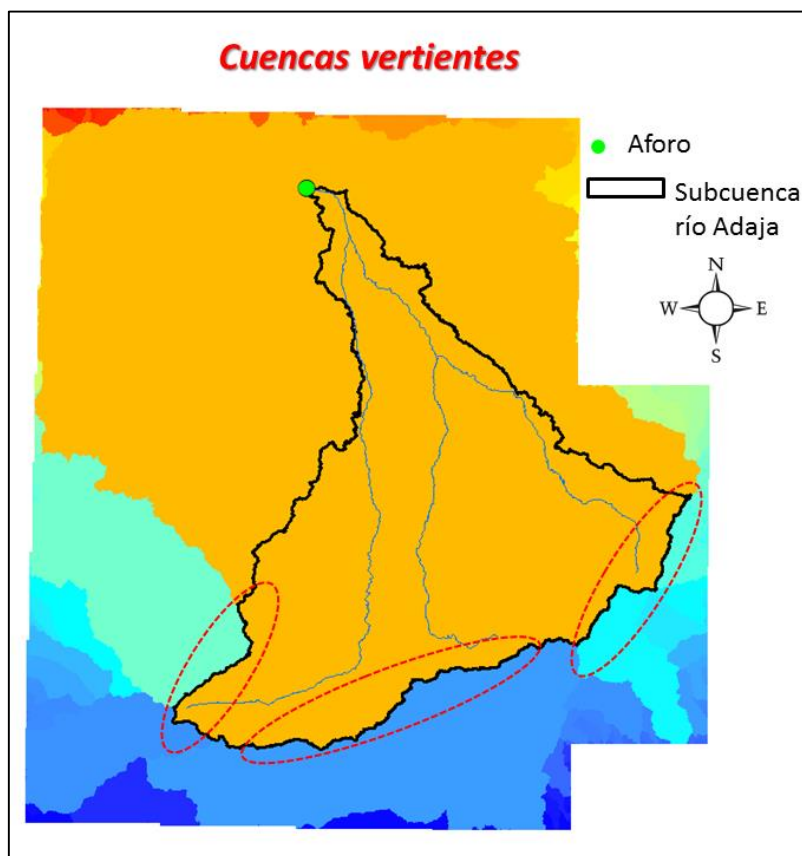


Figura 124. *Cuencas vertientes asociadas a la subcuenca del río Adaja.*
Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

8.4. Dirección y acumulación de flujo

La dirección del flujo determina, en últimas, la cuenca de drenaje definitiva de la subcuenca del río Adaja, constituyendo éste uno de los insumos más importantes en el amplio tema del análisis hidrológico. Tan importante como este, se encuentra el mapa de acumulación de flujo, quien finalmente va a proveer una aproximación a la definición de la red de drenaje principal representada principalmente por ríos y arroyos.

Dicha definición estará, posteriormente, determinada por "el mejor" criterio de decisión dado por el umbral definido para ello, quien "parte" los datos en dos (2) secciones: uno con las zonas de mayor acumulación de flujo y otro con menor acumulación. Los de mayor acumulación de flujo, serán los mejores candidatos a ser cauce de arroyo o río.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la dirección de flujo de la subcuenca, calculado a partir del MDT de 5 metros de resolución espacial descrito anteriormente. En la tabla se muestra el área y el porcentaje de participación de cada una de las direcciones del flujo que detecta el programa de manera automática. Una dirección de flujo que no se encuentre dentro de estas ocho (8) opciones, el software la identifica como zona “endorreica”, que posteriormente ha de eliminarse del análisis por considerarse “agua estancada” que podría introducir ruido al resultado.

No obstante lo anterior, puede resultar esto una limitante (de considerar solo ocho (8) posibles direcciones de flujo) como una falencia del algoritmo implementado y predefinido por el software.

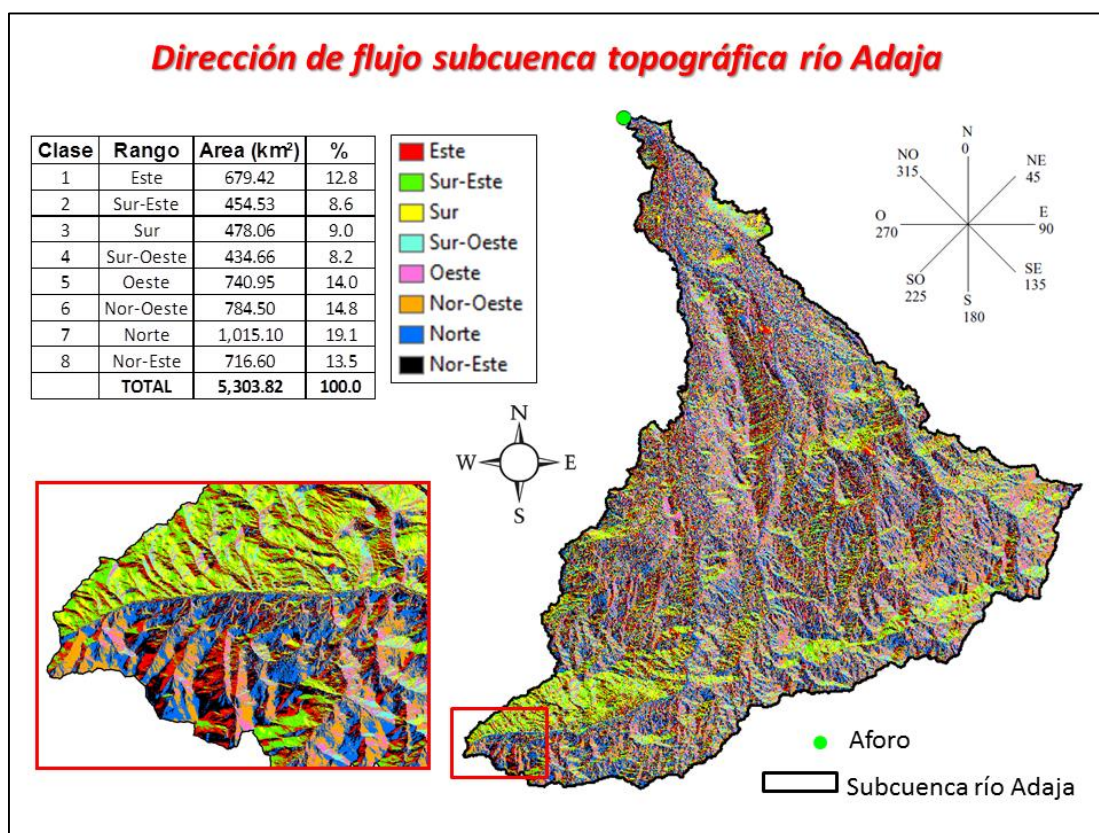


Figura 125. Dirección de flujo de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

8.4.1. Red de drenaje y jerarquía

A continuación, se configura el resultado de la extracción automática de la red de drenaje de la subcuenca, cuyo procedimiento ha quedado descrito en detalle en el capítulo metodológico, utilizando los tres (3) criterios de referencia estudiados previamente.

Adicional a ello, se valida el criterio Strahler y Shreve para asignar un orden jerárquico a la red de drenaje. Dicho orden se aplica sobre el resultado del criterio 2 quien ha arrojado un drenaje “más cercano a lo real”.

8.4.1.1. Extracción automática de la red de drenaje

Para realizar este análisis, se empezará por extraer la red de drenaje principal teniendo en cuenta el mapa de acumulación de flujo calculado previamente.

Se procede a extraer la red de drenaje principal de la subcuenca utilizando los tres (3) criterios descritos anteriormente que definen el umbral sobre el mapa de acumulación de flujo calculado previamente:

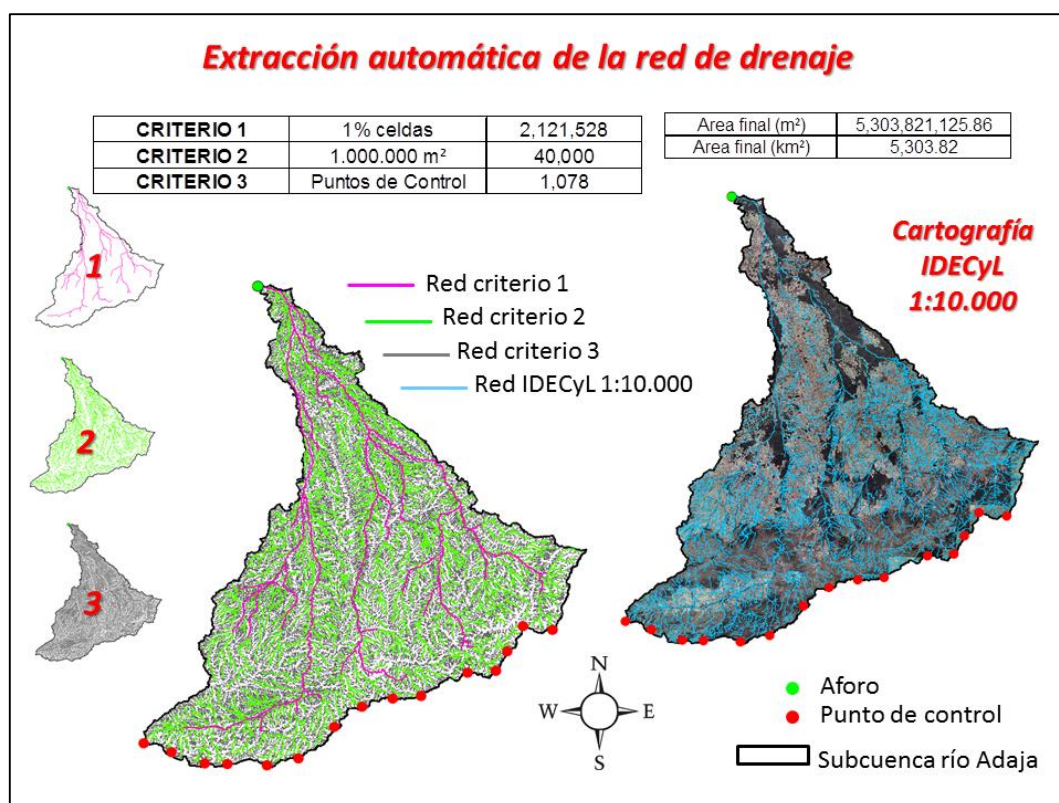


Figura 126. Criterios para la extracción automática de la red de drenaje.
Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Analizando los tres (3) resultados de la red de drenaje obtenidos a partir de la aplicación de los criterios validados, se puede observar que el criterio 1 proporciona una red que generaliza bastante algunos detalles por lo que podría afirmarse que “se queda corto” en la definición de un buen modelo de red de drenaje para la subcuenca.

El criterio 2 detalla “un poco mejor” la red de drenajes proporcionando un modelo que se aproxima al referente cartográfico utilizado para comparar, de manera visual, la precisión en principio temática de los resultados de la extracción automática de la red de drenaje, que se corresponde con la fuente ráster del MTN25. Por ello, este ha sido el resultado elegido para validar, posteriormente, el orden y la jerarquía del drenaje de la subcuenca.

El criterio 3 “exagera bastante” el resultado derivando una red de drenaje bastante densa y aparentemente redundante.

8.5. Jerarquía del drenaje

La siguiente figura muestra el resultado con el orden y jerarquía de la red de drenaje de subcuenca, obtenido con base al drenaje calculado con el umbral referido al criterio 2. Los resultados validados utilizando los métodos Strahler y Shreve indican que el río Adaja tiene una jerarquía de orden 7 y orden 1505, respectivamente.

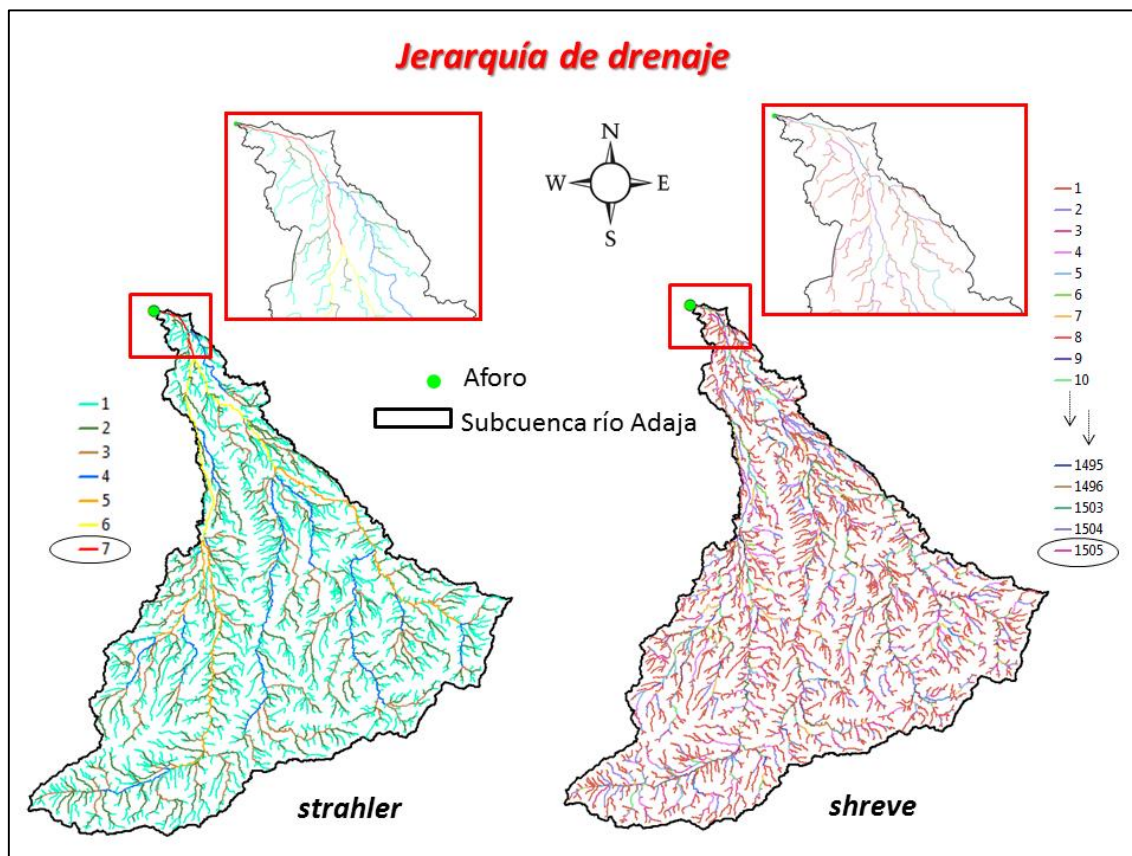


Figura 127. Jerarquía del drenaje de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Los resultados obtenidos con base a los tres (3) criterios evaluados pueden no resultar los mejores, y tampoco son absolutos.

Aquí ha resultado el criterio 2 como el elegido para realizar el análisis de jerarquía, sin embargo, este criterio que definió una red de drenaje de orden Strahler 7, no corresponde a la mejor representación del drenaje real de la cuenca. Este inconveniente no importa aquí porque no es éste el referente que se usa para caracterizar la hidrografía de la cuenca, sino aquella cartografía escala 1:10.000 extraída de la IDECyL. No obstante, el orden analizado es un indicador característico de la importancia de los cauces que sí resulta significativo porque dicho referente extraído del criterio 2 suele ser bastante similar a la realidad (esto se puede observar fácilmente superponiendo de fondo la base cartográfica ráster del MTN25, que también se integra en el presente proyecto).

8.6. Hidrografía

La subcuenca topográfica del río Adaja contiene tres (3) ríos principales: río Adaja, río Eresma y río Voltoya. El Voltoya vierte sus aguas al Eresma, luego el Eresma escurre en el río Adaja y, finalmente, el río Adaja desemboca en el río Duero en el punto de confluencia de la subcuenca.

Como se ha mencionado anteriormente, el río Adaja nace en la Fuente del Ortigal y desemboca en el río Duero. Sus aguas fluyen, primero un tramo hacia el nororiente y luego hacia el norte gran parte, hasta que un pequeño tramo gira hacia el occidente antes de verter sus aguas al Duero.

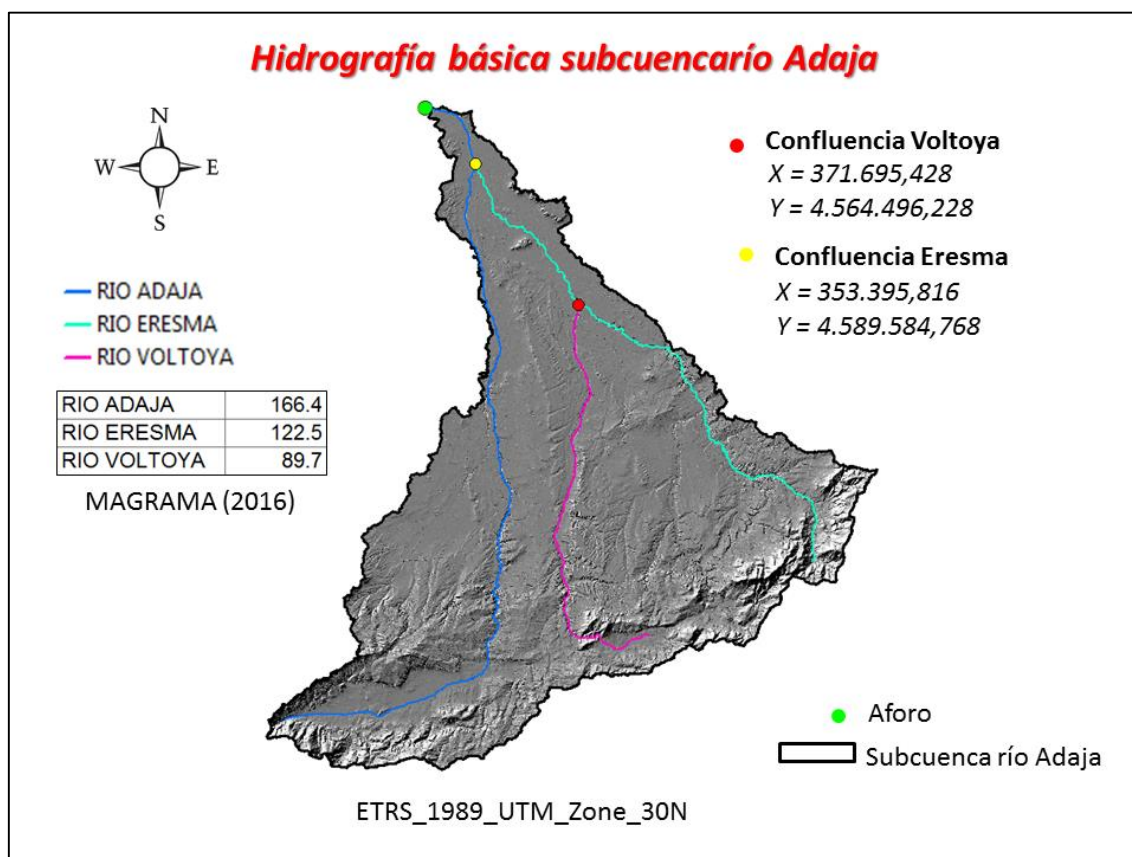


Figura 128. Hidrografía básica de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

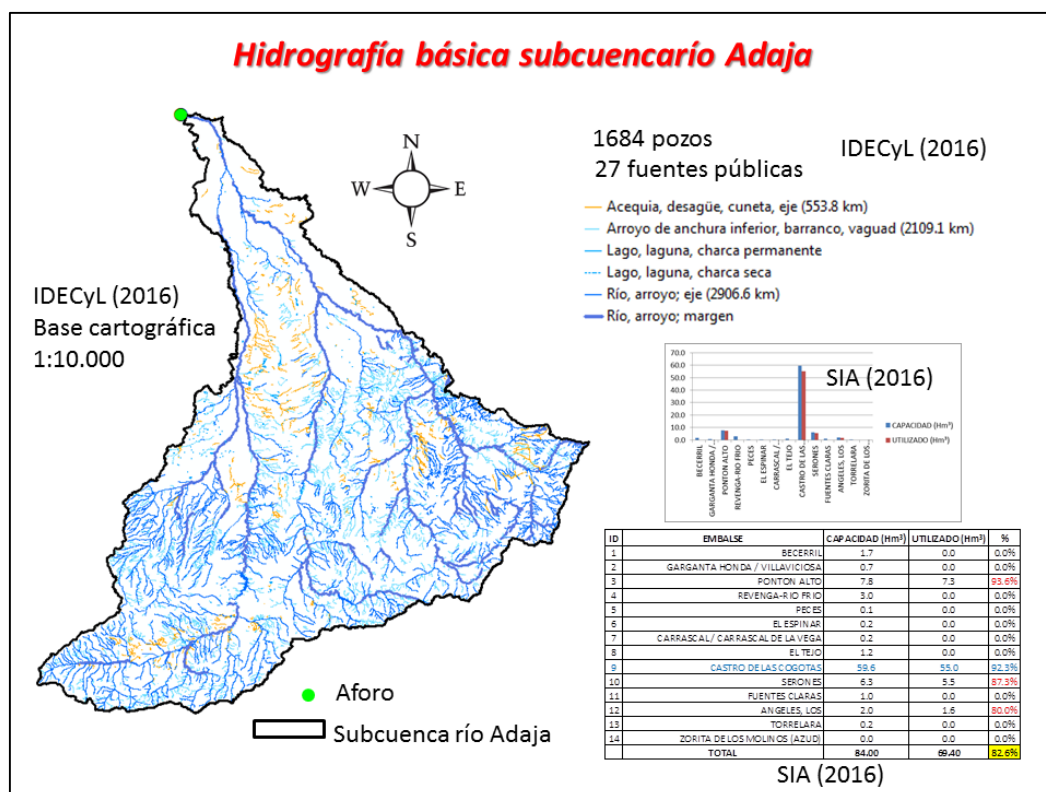


Figura 129. Hidrografía detallada de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

8.7. Infraestructura vial

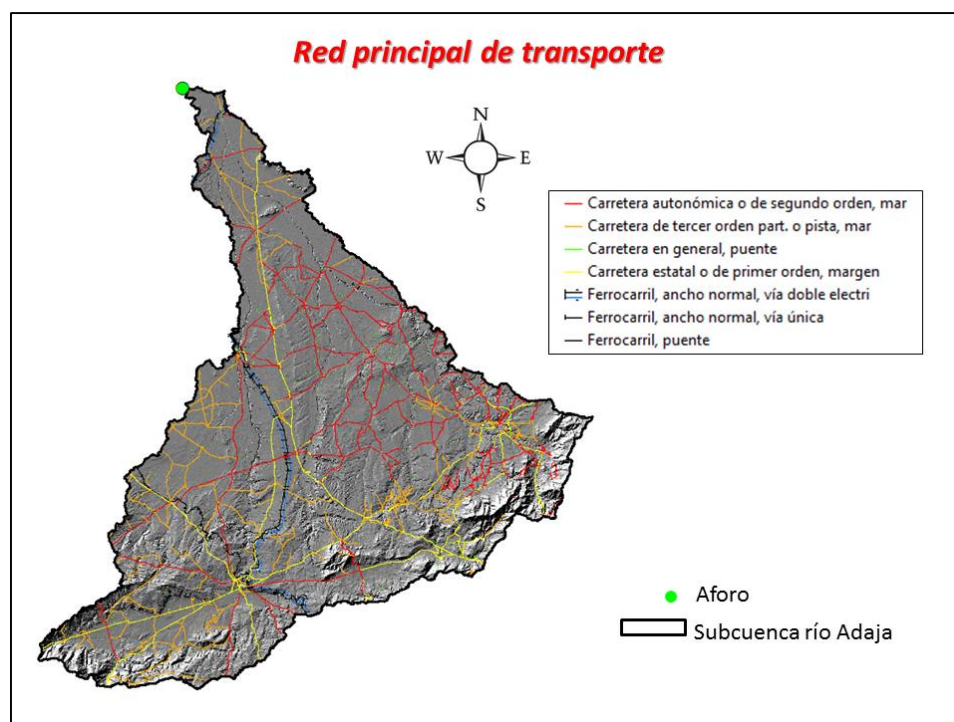


Figura 130. Red principal de transporte de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

8.8. Ocupación del suelo

Huerta (2016) considera que "es importante para los estudios hidrológicos estimar el porcentaje de los determinados usos del suelo, ya que van a influir en la capacidad de infiltración de agua en la cuenca", por lo que se ha construido una tabla con las áreas y porcentajes de 53 clases o tipos de ocupación del suelo según el SIOSE 2011.

Se toma como referencia el producto de ocupación del suelo SIOSE (Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España) vigencia 2011 escala 1:25.000 obtenido en formato vectorial del centro de descargas del CNIG.

Se procede a realizar las respectivas asociaciones entre elementos geográficos y tablas alfanuméricas con el propósito de establecer correspondencia entre la representación del polígono y el nombre asignado a la cobertura.

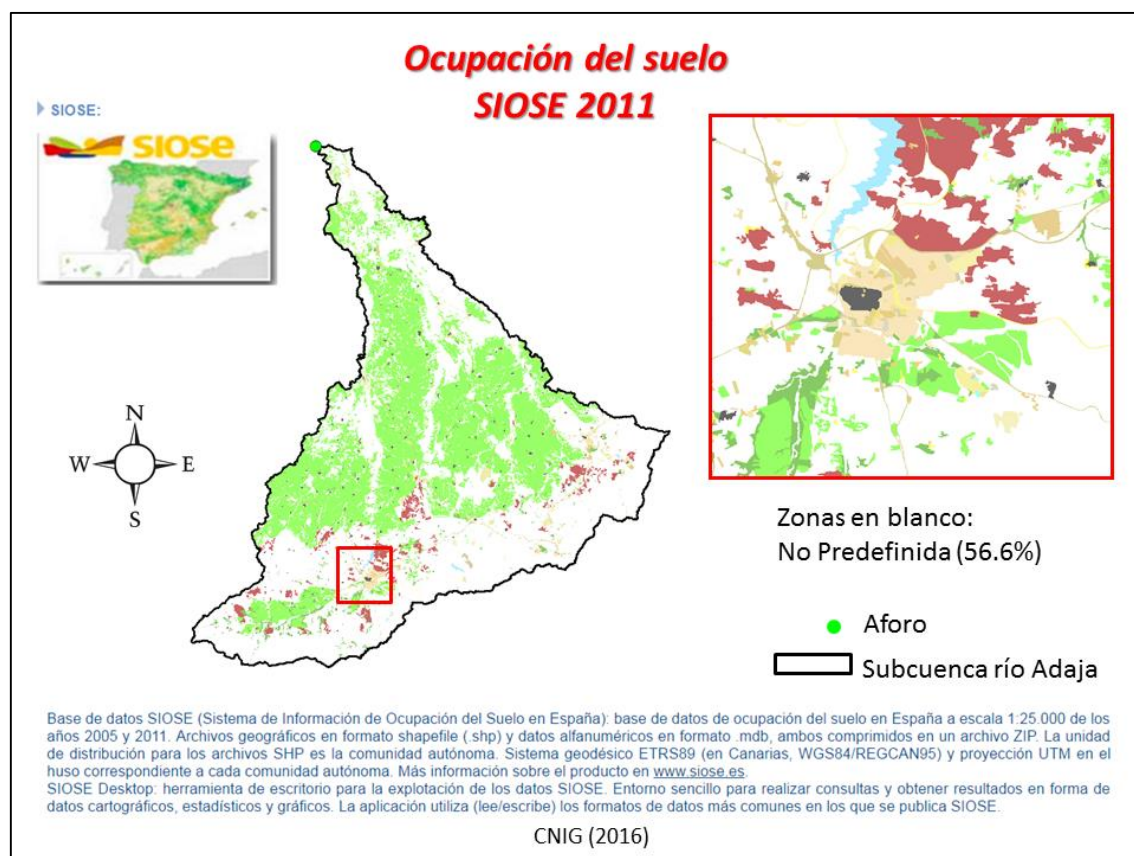


Figura 131. Ocupación del suelo de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

La mayor representación de ocupación del suelo, con un 56,6 % del área total de la subcuenca, se identifica con la descripción de "No predefinida", categoría que no muestra una cobertura del suelo específica y que podría resultar interesante, a manera de desarrollos futuros, indagar un poco más acerca de lo que ello significa según el SIOSE 2011 (revisión del SIOSE 2005), e incluso comparar con las descripciones la ocupación del suelo referidas a otras fuentes como las de CORINE LAND COVER.

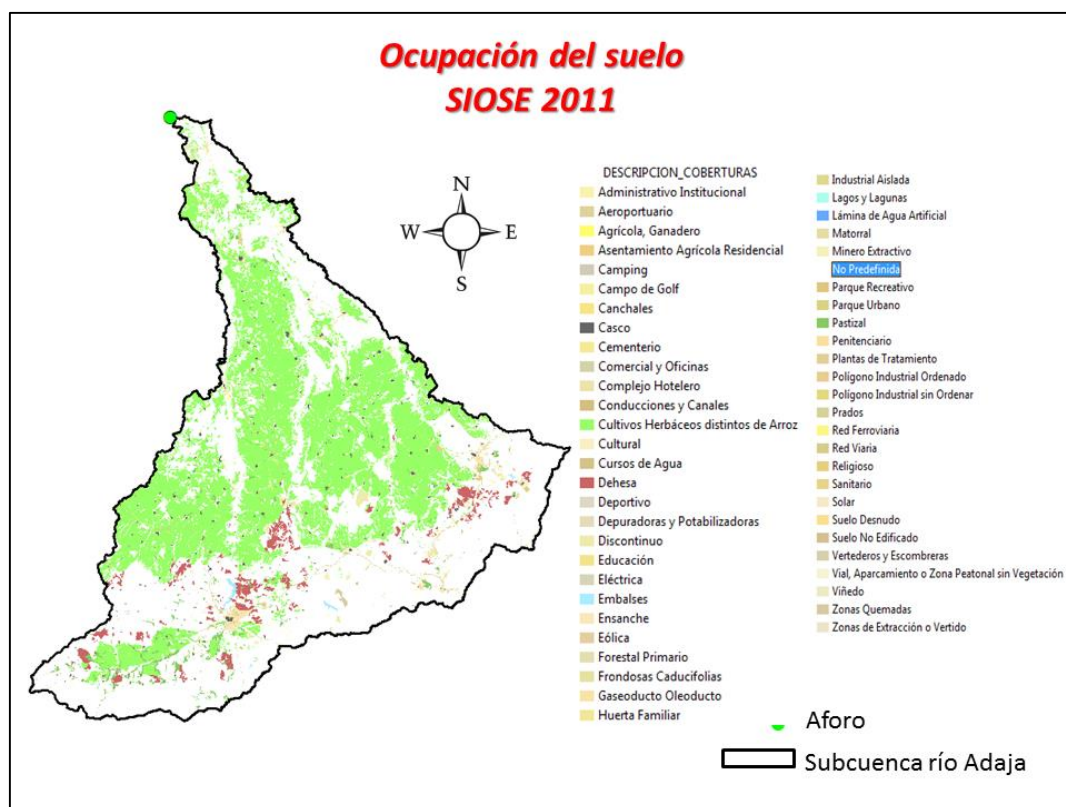


Figura 132. Descripción de coberturas de la ocupación del suelo de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.



Figura 133. Áreas y porcentajes de participación de la ocupación del suelo de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

8.9. Aspectos geológicos y edafológicos

Se ha relacionado cartografía en formato ráster proveniente de dos (2) fuentes: el IGME y la CHD. La segunda fuente provee cartografía más vigente, no obstante, se encuentra en formatos que, posteriormente a manera de desarrollos futuros, habrá de ser conveniente convertir en formatos vectoriales.

Dado lo específico, extenso y detallado de las leyendas de cada una las planchas 1:50.000 ofrecidas por el IGME, se han relacionado como anexos con el propósito de proveer un incentivo de consulta para aplicaciones de futuros usuarios.

Este aspecto es importante porque, de acuerdo con Huerta (2016), *"el drenaje no es igual en distintos tipos de rocas"*, lo que podría proveer información valiosa para el análisis de los drenajes de la subcuenca, además, añade que, *"la porosidad y permeabilidad de las rocas condicionará la parte de la precipitación que se convertirá en escorrentía"*.

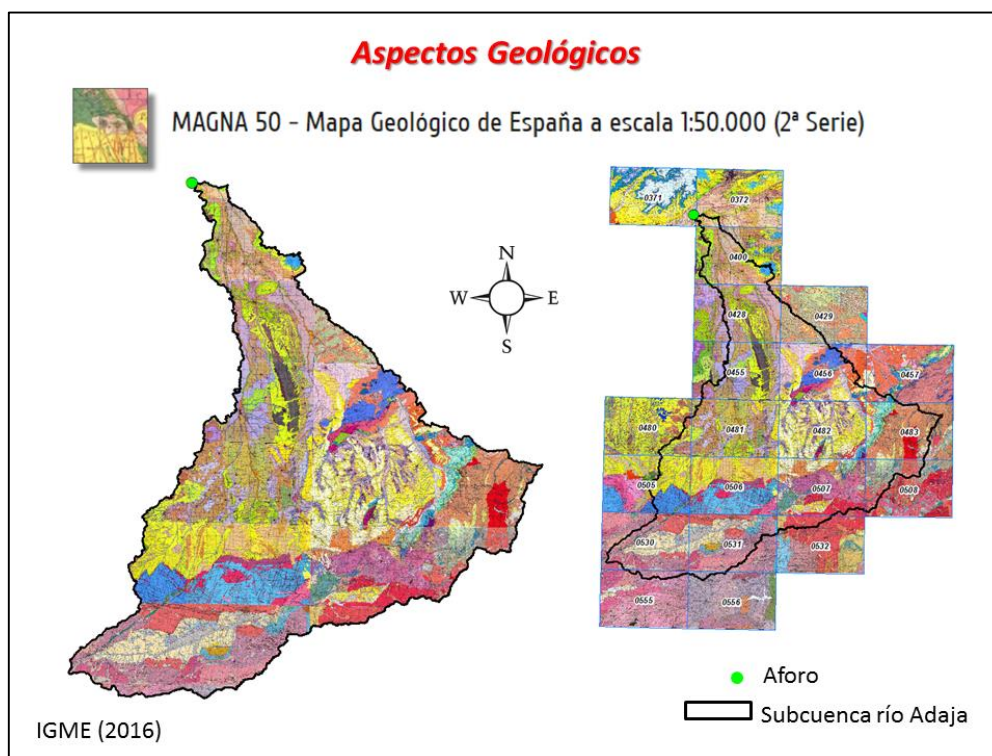


Figura 134. Geología MAGNA 50 de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

Las leyendas que indican el significado de cada una de las unidades geológicas en el marco de la referencia MAGNA50, se anexan de manera independiente para cada una de las 21 hojas del MTN50 que cubren en su totalidad el área de la subcuenca.

A continuación, se ilustran algunas leyendas, no obstante, el anexo contiene la totalidad de ellas para su futura consulta en detalle.

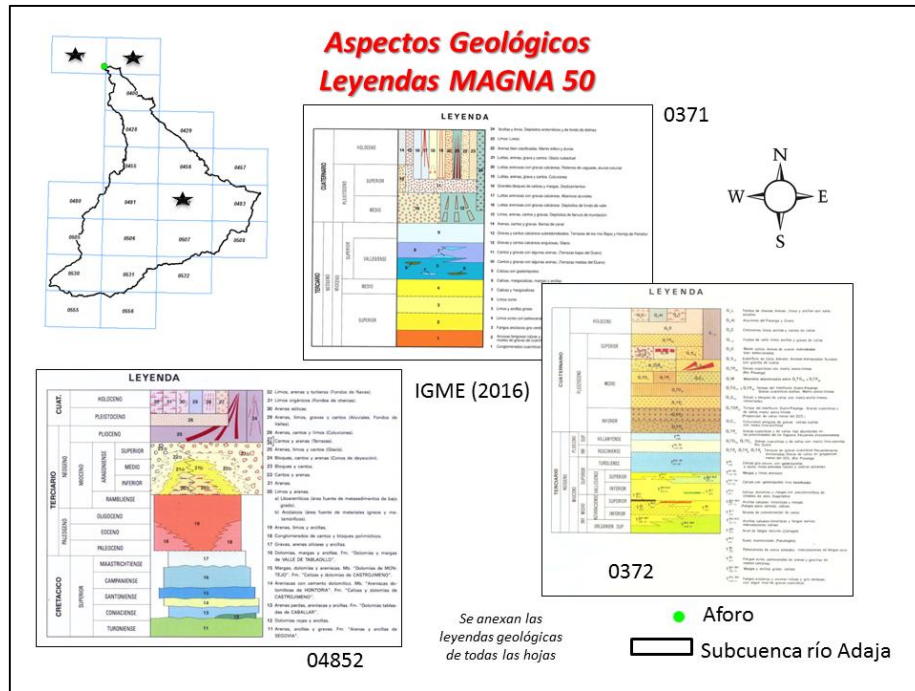


Figura 135. Leyendas de la geología MAGNA 50 de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

De igual manera, como se ha mencionado anteriormente, se referencia la cartografía geológica realizada por la CHD, cuyas leyendas se encuentran consolidadas y generalizadas.

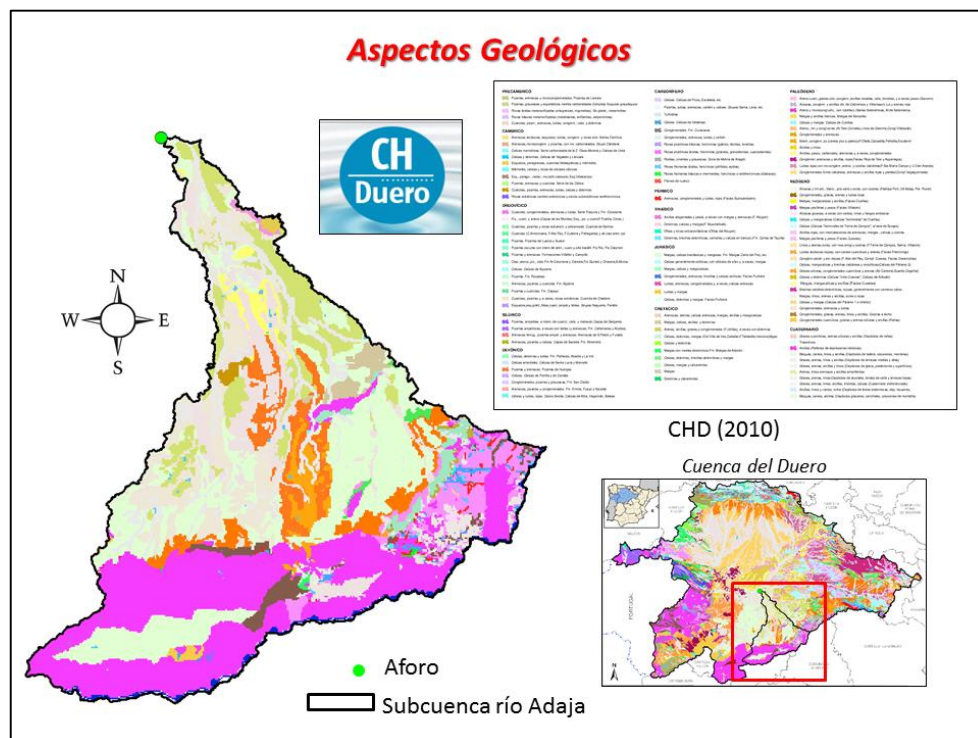


Figura 136. Aspectos geológicos de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

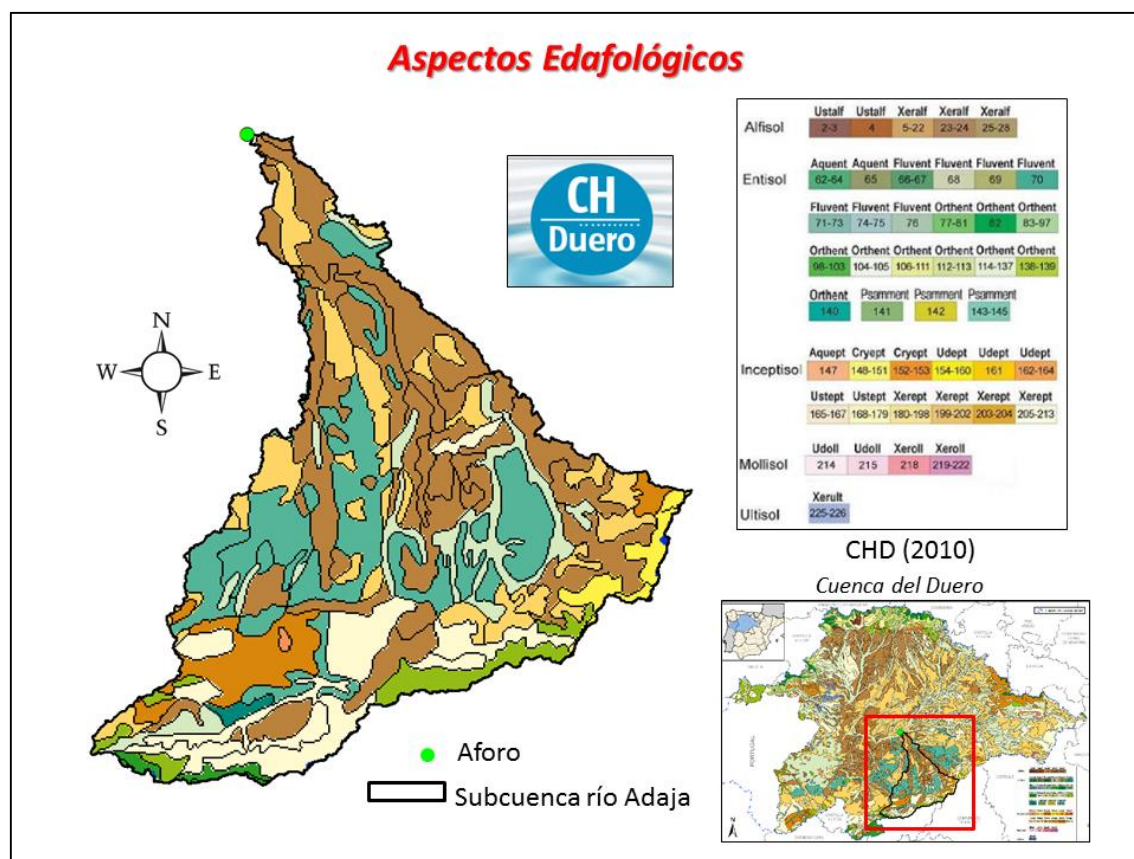


Figura 137. Aspectos edafológicos de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

8.10. Aspectos climáticos

Este apartado consolida las principales características climáticas de la subcuenca, integrando información geográfica ráster a escala 1:1.000.000, relacionada con:

- Precipitación total anual (mm)
- Temperatura media anual (°C)
- Evapotranspiración potencial anual (mm)
- Evapotranspiración real anual (mm)
- Escorrentía subterránea anual (mm)
- Recarga de acuíferos anual (mm)
- Escorrentía total anual (mm)
- Aportación media anual en régimen natural.

Cada uno de ellos contiene su respectiva información alfanumérica asociada representada por las leyendas según los rangos de valores organizados en 32 grupos.

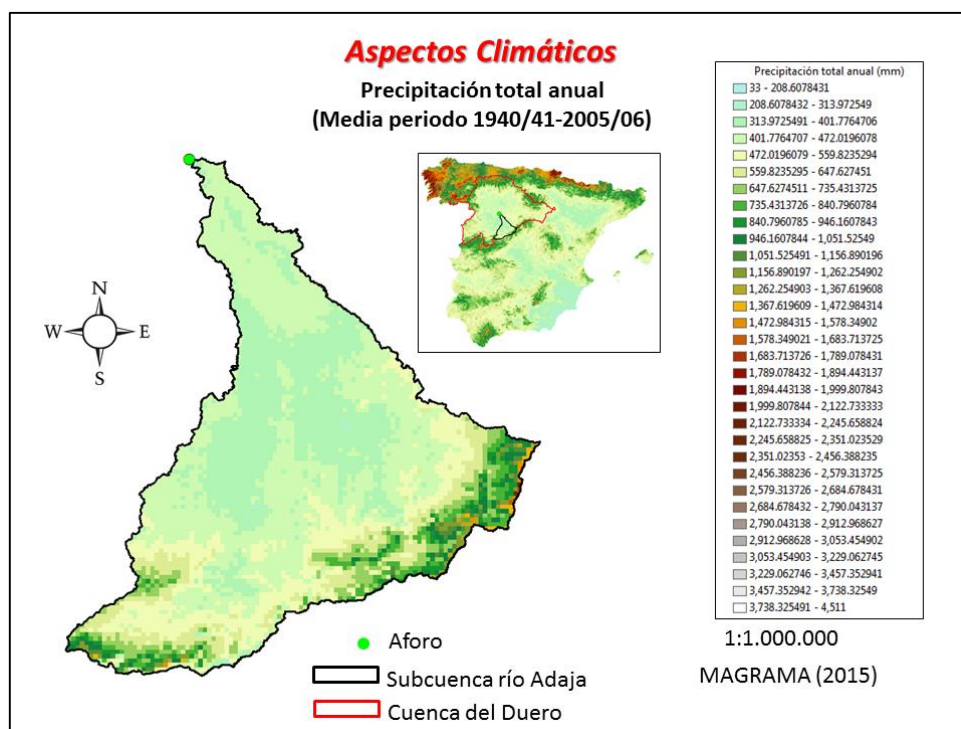


Figura 138. Precipitación total anual (mm) de la subcuenca del río Adaja.
Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

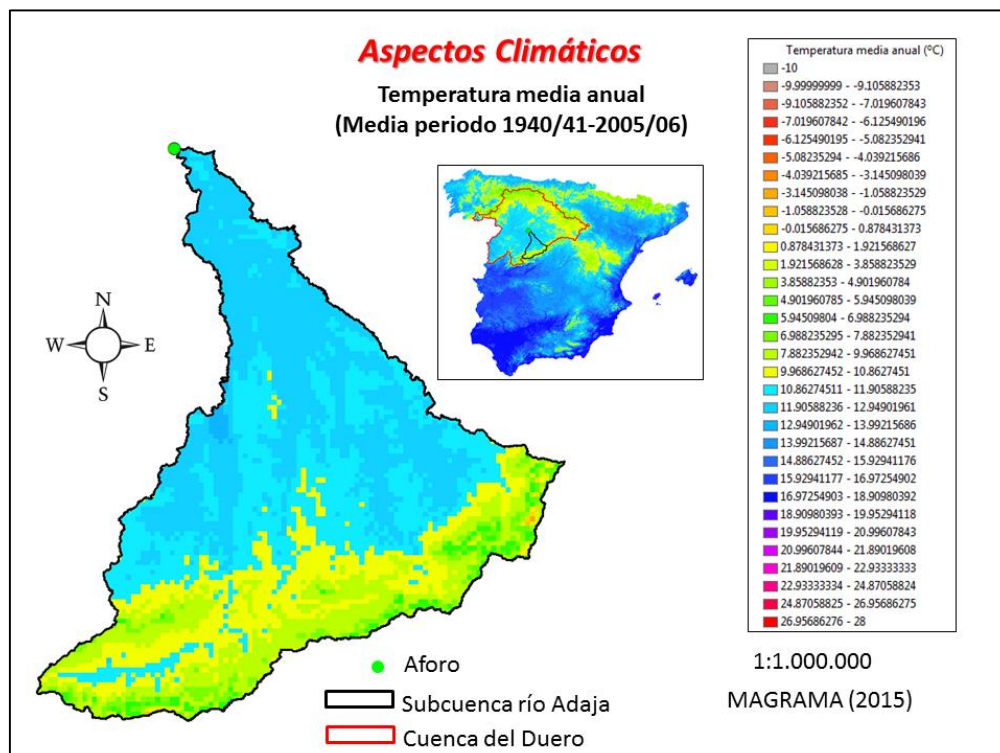


Figura 139. Temperatura media anual (°C) de la subcuenca del río Adaja.
Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

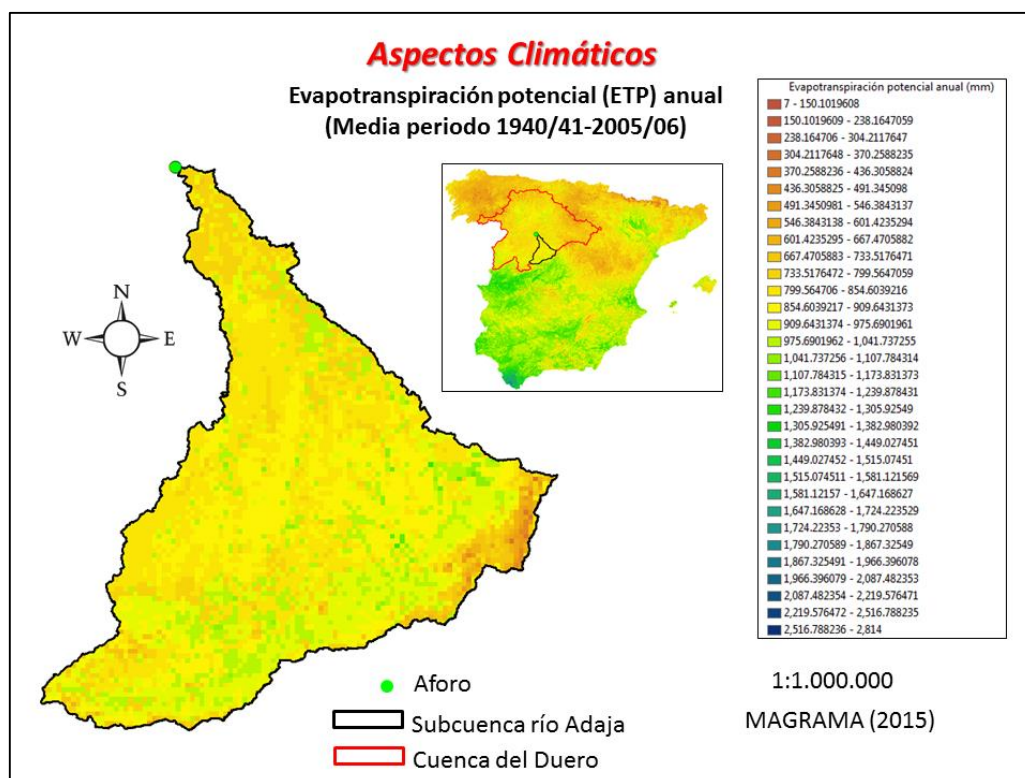


Figura 140. Evapotranspiración potencial anual (mm) de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

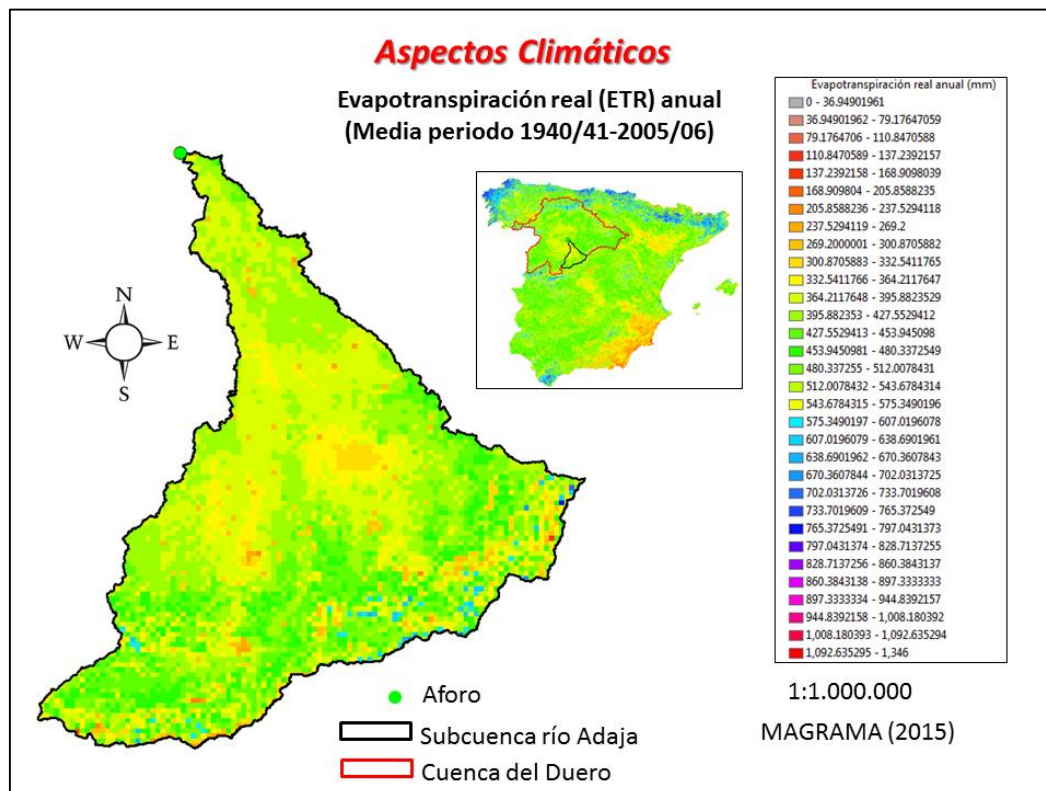


Figura 141. Evapotranspiración real anual (mm) de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

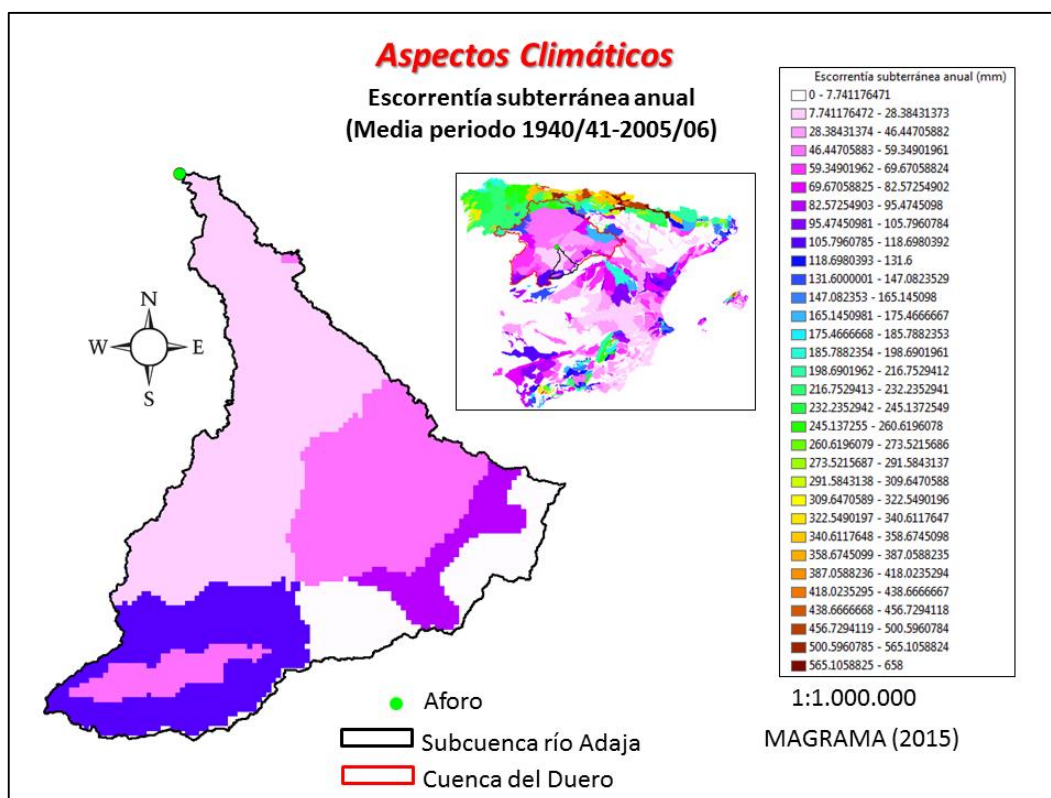


Figura 142. Escorrentía subterránea anual (mm) de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

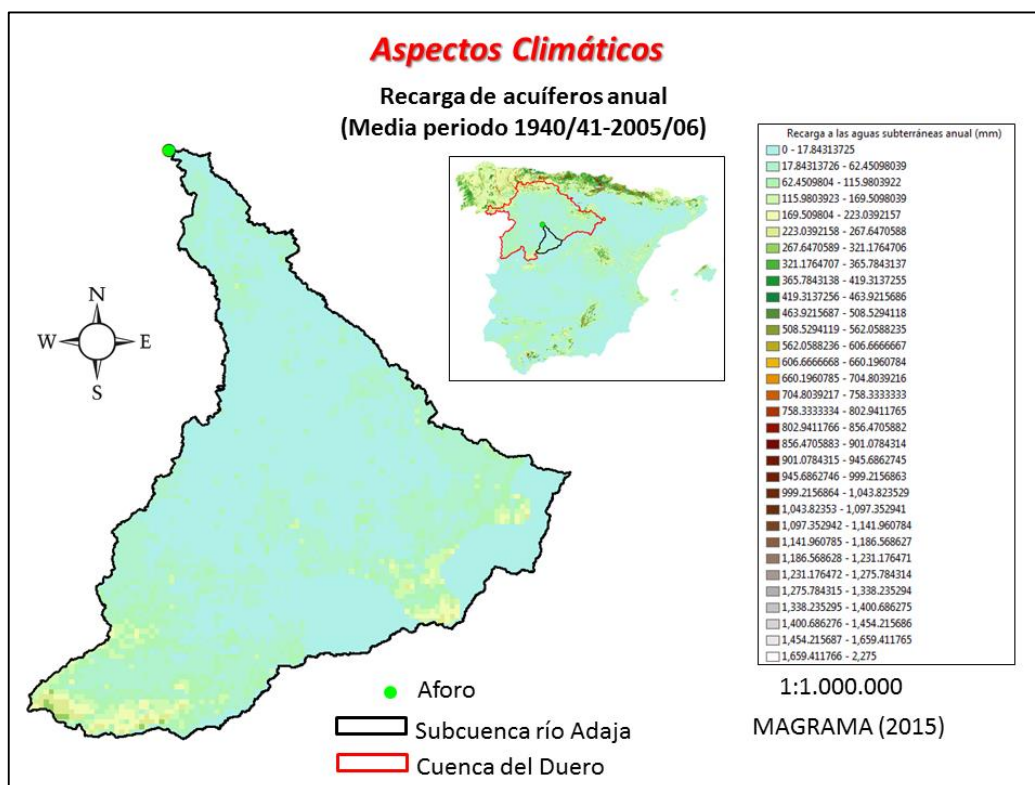


Figura 143. Recarga de acuíferos anual (mm) de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

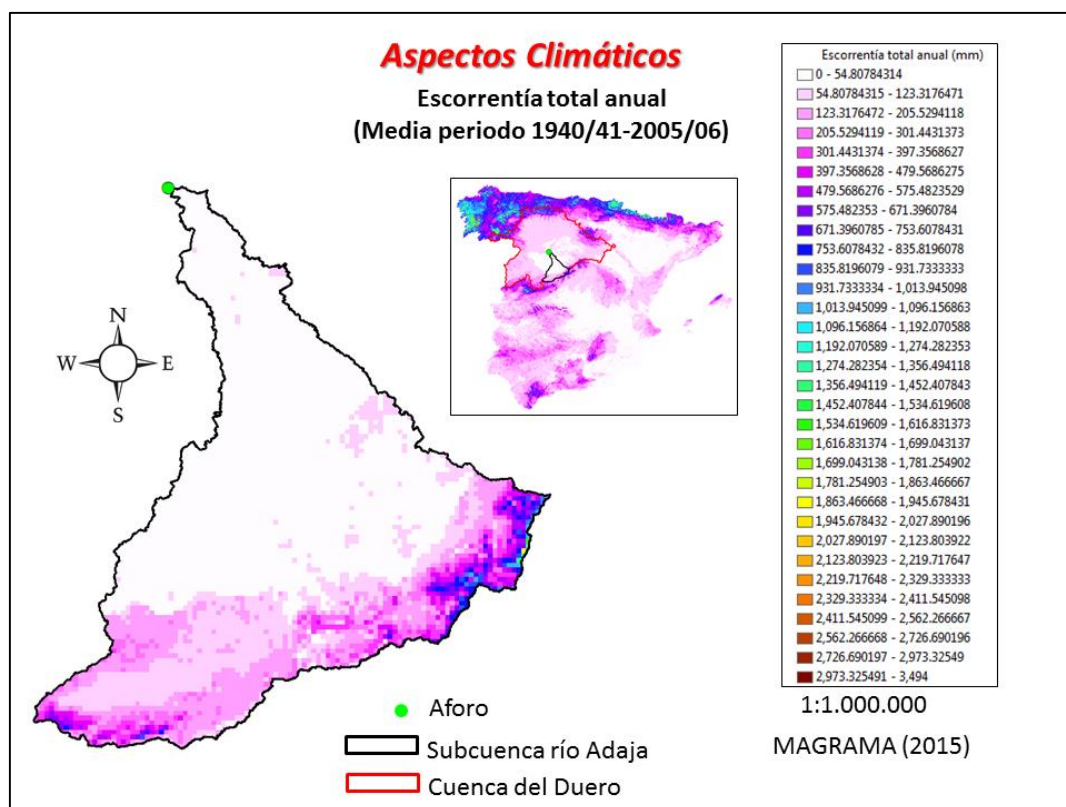


Figura 144. Escorrentía total anual (mm) de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

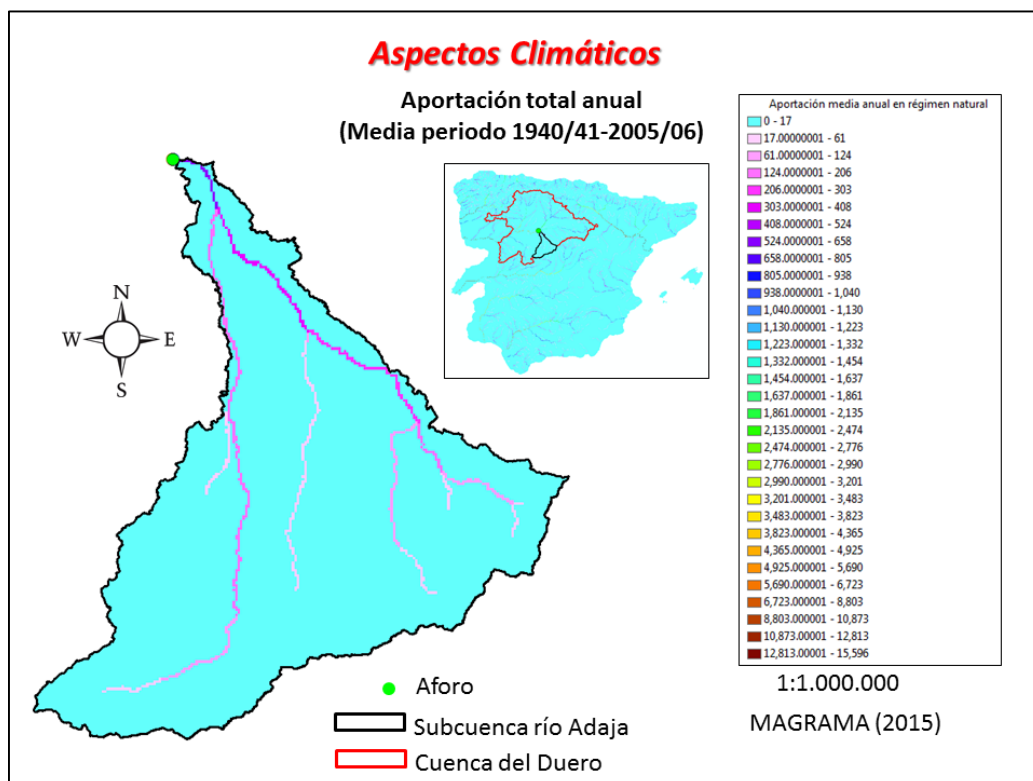


Figura 145. Aportación media anual en régimen natural de la subcuenca del río Adaja. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

8.11. Lista de mapas

8.11.1. Cartografía base

- Mapa de cartografía base
- Mapa de ortofotografía aérea PNOA
- Mapa Topográfico Nacional 1:25.000 MTN25
- Mapa de ocupación del suelo SIOSE 2011

8.11.2. Cartografía geológica y edafológica

- Mapa geológico MAGNA 50
- Mapa geológico CHD
- Mapa edafológico CHD

8.11.3. Cartografía climática

- Mapa de precipitación total anual
- Mapa de temperatura media anual
- Mapa de evapotranspiración potencial anual
- Mapa de evapotranspiración real anual
- Mapa de escorrentía total anual

8.11.4. Cartografía orográfica y jerarquía del drenaje

- Mapa de elevaciones
- Mapa de pendientes
- Mapa de orientaciones
- Mapa de sombreado
- Mapa de cuencas vertientes
- Mapa de dirección de flujo
- Mapa de acumulación de flujo
- Mapa de jerarquía del drenaje

8.12. Diseño de plantillas y salidas gráficas

Los mapas finales se han organizado en plantillas básicas de salida final para impresión. El tamaño del papel se corresponde con A2 (42 cm x 59,4 cm).

Cada temática agrupa un mapa general a escala 1:350.000 donde se muestra la totalidad superficial de la subcuenca, y 21 mapas desagregados a escala 1:50.000 cada uno (correspondencia con cuadrícula MTN50), con el propósito de apreciar el detalle en la salida final.

La grilla o cuadrícula de escala 1:50.000 de guía para la representación de las salidas gráficas finales se ha ajustado de tal manera que el tamaño de cada celda represente una única porción del total de la subcuenca y los bordes se traslapen en una mínima porción suficiente para obtener, al final, un cubrimiento total.

Las temáticas con información geográfica de escalas pequeñas (como la climática), se organizan en una salida gráfica general establecida por una escala 1:350.000 para el tamaño de papel elegido.

8.12.1. Cuadrícula de salida final de mapas análogos

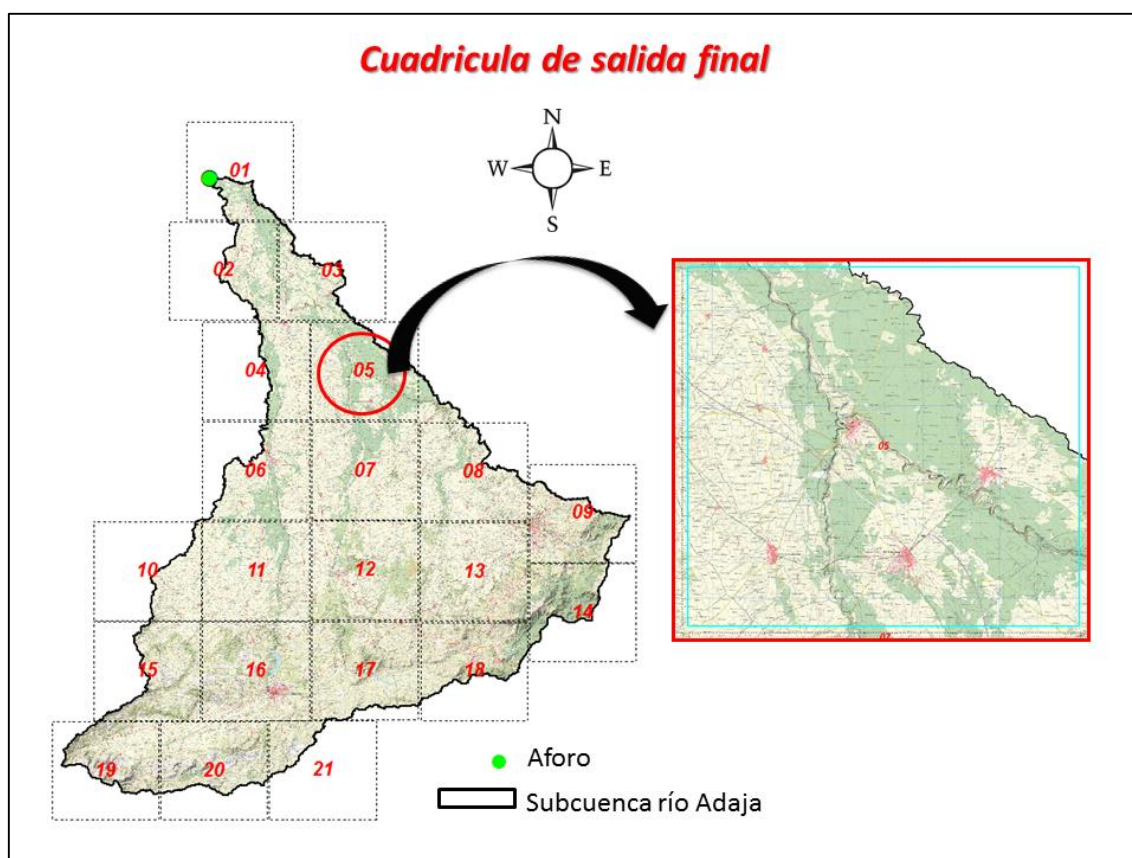


Figura 146. Cuadrícula de salida final gráfica de mapas análogos. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

8.12.2. Modelo de plantilla y salida final gráfica

Se procede a configurar una plantilla de salida gráfica final que acompaña la ilustración de los mapas finales con fines de impresión en papel tamaño A2 a escalas de 1:50.000 para las 21 hojas en temáticas que presentan mayor detalle por representar escalas grandes, y 1:350.000 ajustado para temáticas que ilustran de manera cómoda la información geográfica en una sola hoja con el área total de la subcuenca.

Los mapas finales se exportan en formato imagen sencilla tipo JPEG, cuidando que dicho proceso de transformación no distorsione la nitidez de lo que se observa, y finalmente se adjuntan al presente trabajo a manera de anexo.

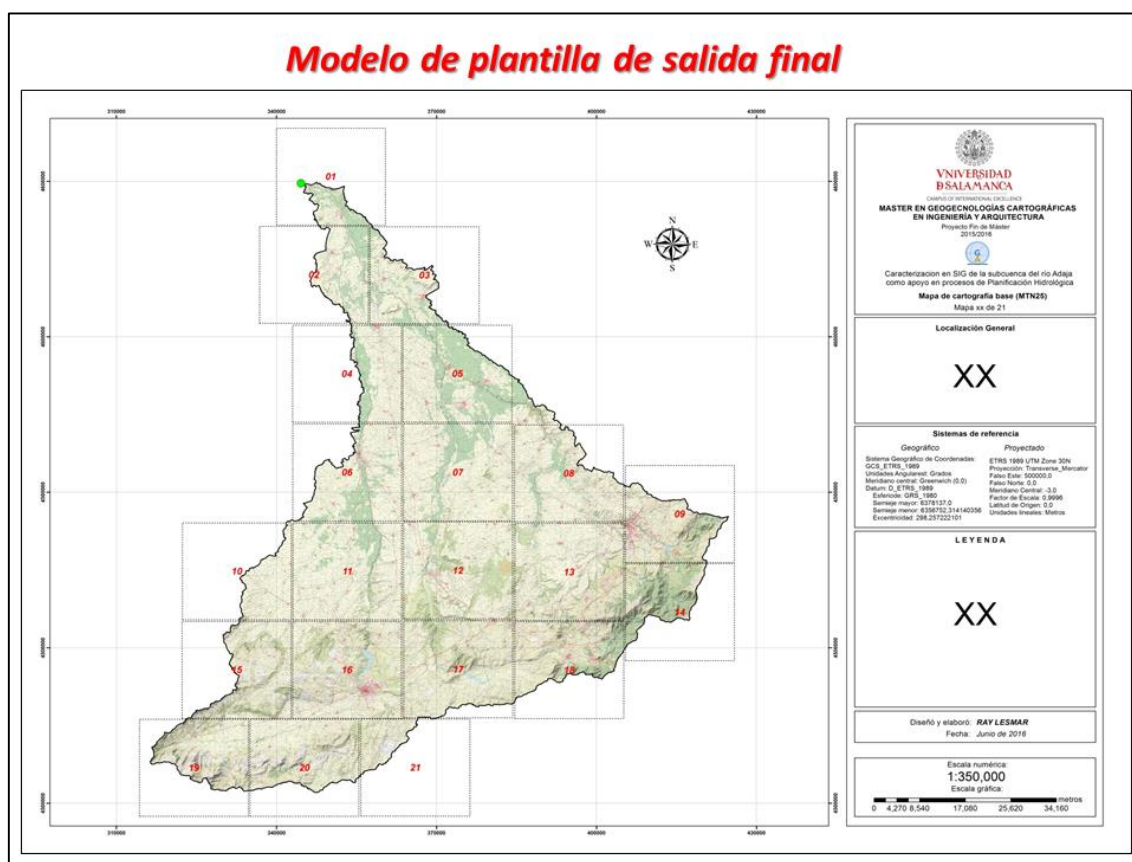


Figura 147. Modelo de plantilla y salida final gráfica de mapas. Adaptación de la figura: Ray Lesmar.

9. CONCLUSIONES

Es un aporte reunir y revisar cartografías a mayor escala, siguiendo criterios objetivos y legados literarios importantes, y disponerla en un lugar virtual apropiado para ello, en formatos que faciliten la incorporación futura de reglas topológicas, entre otras ventajas, y generar una iniciativa para el desarrollo de procesos futuros, que conlleven a buscar instrumentos de planificación del agua cada vez más sostenibles.

Es conveniente continuar con la adecuación de la BDG desde una perspectiva estructural y topológica, de manera que siga siendo cada vez más un recurso que favorezca las aplicaciones SIG de las que se han de derivar múltiples productos y, aunque la revisión estructural y topológica rigurosa de la cartografía vectorial de referencia no se encuentra dentro del alcance del presente proyecto, ha permitido caracterizar los aspectos físicos superficiales más relevantes de la subcuenca del río Adaja, prestando especial importancia al tratamiento de la información geográfica tipo ráster, y derivados de importancia orográfica a partir del MDE, como principales aspectos a tener presente en posteriores análisis hidrológicos.

El éxito de un SIG es encontrar el punto de equilibrio entre los requerimientos del usuario, la información geográfica disponible, la información geográfica a producir, la selección y la combinación cartográfica multiescala proveniente de las distintas fuentes. La fidelidad de la fuente de información es importante porque ha de introducir mayor propiedad y formalidad a los productos SIG derivados.

Son innumerables las aseveraciones acerca de la concepción de SIG, no obstante, el concepto más inteligente se estima alrededor de la capacidad con la que se planifica, diseña e implementa el SIG, para satisfacer los objetivos y propósitos específicos de un proyecto comercial y/o académico. El SIG es exitoso, o menos exitoso, en la medida que cumpla mejor los objetivos propuestos y/o las expectativas de un cliente.

Pretender imponer flujos de trabajo SIG específicos puede no resultar conveniente, sin embargo, es importante que cada usuario construya mentalmente un flujo que se adapte mejor a sus maneras de ver el mundo, y así lograr optimizar procesos, siguiendo lineamientos (aunque mínimos, pero claramente definidos) acerca de la normalización en la estructuración de su cartografía y orientados hacia la consecución de los objetivos de su proyecto.

Más allá de caracterizar y desarrollar SIG en materia hidrológica, el fin último de toda Planificación Hidrológica debe enfocarse en promover e intensificar el uso de fuentes de energía renovables. La construcción de presas y embalses, son una fuente clara del aprovechamiento del potencial hídrico de una región, que, además de garantizar el uso, la demanda, el consumo y el retorno del recurso en el tiempo, contribuyen al desarrollo sostenible que, junto con otras alternativas de generación energética a base de recursos naturales renovables, como el viento, el sol, la biomasa, etc., pueden sumarse para lograr desplazar cada vez más las emisiones de agentes contaminantes.

El primer objetivo específico, que propuso consolidar y estructurar una base de datos geográfica en formato SIG mediante la integración y tratamiento de cartografía oficial española proveniente de diversas fuentes, se ha cumplido porque la BDG aquí propuesta ha reunido y ha juntado información geográfica dispersa y en distintas condiciones y niveles de calidad, estableciendo, así, las bases cartográficas como principio de una larga carrera en la búsqueda del mejor SIG para proveer respuestas oportunas.

El segundo objetivo específico, que propuso configurar y proveer las bases cartográficas en un entorno SIG, se ha cumplido porque el repositorio cartográfico aquí consolidado y estructurado, desde un nivel básico y primario, ha sido concebido desde una BDG utilizando un Sistema Gestor de Bases de Datos (SGBS) apropiado, y utilizando un modelo relacional, lo que en conjunto constituyen un entorno SIG que hace posible el análisis espacial mediante el geoprocésamiento, además de que favorece la implementación de reglas topológicas.

El tercer objetivo específico, que propuso conocer y documentar el entorno hidrológico básico de la subcuenca asociada al cauce principal del río Adaja, se ha cumplido porque se ha realizado una rica pero básica selección de temáticas provenientes de “fuentes creíbles” oficiales que, de varias maneras, han permitido conocer “más de cerca” algunos detalles físicos que rondan el cauce principal del río Adaja.

Acuñar el propósito de caracterizar con fines de planificación hidrológica, es un mensaje para animar y promover la importancia que merece el agua. Actualmente, la CHD hace un estupendo trabajo, no obstante, siempre hay detalles que se ven mejor a la luz de un mayor “zoom” de la realidad. Por ello, un aporte importante también es haber consultado y reunido buenos referentes literarios de planificación hidrológica, cartografía, SIG y desarrollo sostenible, no siendo siempre los más actuales los mejores y más apropiados, así como no siempre la foto más actual o la de mayor resolución son las más apropiadas para ciertos propósitos.

La concepción de IDE debe proveer cartografía realizada y pensada para ser usada de manera inmediata para obtener una solución SIG, por un experto o no muy experto en el tema. El usuario que la tiene disponible todo el tiempo en la Web debe descargarla lista, estructurada y topológicamente validada para realizar sus análisis.

El fácil acceso a la información geográfica de calidad, así como la facilidad de uso e interpretación de la misma mediante un gestor de bases de datos comercial o no, constituye el principio fundamental del éxito geográfico y/o cartográfico de un país. Ello se implementa haciendo uso las Infraestructuras de Datos Espaciales, como iniciativas de integración, consolidación, interoperabilidad, alcance, facilidad, acceso y, en definitiva, una información geográfica de calidad democráticamente dispuesta al servicio de todos.

10. DESARROLLOS FUTUROS

Desarrollos futuros desde la perspectiva técnico operativa asociados a la estructuración y topología de los elementos geográficos vectoriales de la BDG hay que resaltar que, de manera inmediata en un contexto con otro alcance, es conveniente continuar con la adecuación de la BDG de manera que siga siendo cada vez más un recurso que favorezca las aplicaciones SIG de las que se han de derivar múltiples productos que serán útiles como apoyo en la formulación de futuros instrumentos de planificación asociados al recurso hídrico de la subcuenca del río Adaja.

Ahora mismo, ya es un producto cartográficamente útil para pensar en el diseño de futuros SIG para la formulación de políticas y normas orientadas al desarrollo sostenible del agua, no obstante, es un producto básico que ha sido seleccionado y montado en una plataforma SIG, y del cual se ha derivado una pequeña pero importante caracterización de la subcuenca topográfica.

Se debe continuar con la incorporación y conversión de temáticas de base ráster a formato vector, procesos de digitalización/vectorización que pueden derivarse fácilmente de lo que ahora mismo contiene, pero demandan tiempo y recurso humano especializado. Por ejemplo, la caracterización geológica reposa como un ráster y, que estando representado en formato vector, puede ser muy útil en la solución de un problema multicriterio en la localización de zonas óptimas para el emplazamiento de una u otra locación de interés ambiental y sanitario, como por ejemplo una planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos, y muchos otros derivados similares que comprometen una decisión importante para la administración local.

Desarrollos futuros desde una perspectiva de aplicaciones y derivados cartográficos para el análisis hidrológico, el producto aquí generado facilita la solución de cuestiones relacionados con el cálculo de caudales, intensidad de precipitación, índice de torrencialidad, tiempo de concentración, coeficiente de umbral de escorrentía, áreas y uniformidad de distribución temporal, estimación de caudales máximos, estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en ríos, etc., enmarcados en el contexto español dentro de la Nueva Norma 5.2-IC de Drenaje Superficial de la Instrucción de Carreteras (nuevo panorama cuyo antecedente data de 1990). Todo ello constituyendo variables hidrológicas que ayudan al ampliar el conocimiento de la dinámica del agua al interior de una cuenca de drenaje y que proveerán indicadores para analizar el agua con el propósito de buscar las mejores alternativas asociadas al uso, la demanda, el consumo y el retorno del recurso hídrico como principios de la planificación hidrológica sostenible.

Esta selección cartográfica provee los elementos cartográficos básicos y necesarios para analizar todo lo relacionado en la construcción de embalses y presas para controlar los flujos en determinada región, constituyendo éstos uno de los objetivos fundamentales en los planes hidrológicos, y con ellos el fomento del desarrollo sostenible del agua mediante su uso como fuente de energía renovable, y junto a ello las políticas claras en relación con el retorno

de las aguas usadas a los cauces naturales, son a consideración el principio que aporta la connotación de sostenibilidad.

Otras aplicaciones puntuales derivadas de esta base cartográfica seleccionada y elegida a criterio de pilares literarios, en principio, puede servir para desarrollos futuros relacionados con la determinación de zonas de riesgo de erosión y de inundación, la estimación de distancias, rutas óptimas y zonas de influencia, determinación de puntos vulnerables susceptibles a contaminación por derrame accidental de sustancias contaminantes a los cuerpos de agua, determinación de zonas con riesgo de incendio y mapas de probabilidad de ocurrencia, análisis multicriterio para el emplazamiento de vertederos y plantas de tratamiento de residuos sólidos urbanos, análisis de riesgo por deslizamiento de laderas, análisis de riesgos ante fenómenos meteorológicos adversos, análisis de riesgos ambientales asociados al transporte de mercancías peligrosas, análisis de perfiles de cauce por secciones transversales, análisis de cuencas visuales, etc.

Siempre resultará importante referir alternativas de software para implementar los SIG. Sin importar la procedencia o el costo de las licencias informáticas para la gestión, el análisis y el geoprocesamiento de la información geográfica y espacial, estos deben conducir y proveer resultados similares. Aquí se ha usado una licencia de software de la Universidad de Salamanca para fines académicos, no significando que las licencias “Open Source” y/o “Open Source de código abierto” no merezcan la importancia que representan, hoy cada vez con mayor fuerza.

Alternativas SIG al uso de productos ESRI, como líder del mercado actual, cabe referenciar paquetes robustos como QGIS o gvSIG, y sus valiosos complementos “plugins”. Lo comercial no significa inferioridad o incompetencia, sin embargo, el usuario que ha de enfrentarse a una decisión informática, primero deberá evaluar los alcances de su proyecto y, antes de su implementación, definir el gestor adecuado y apropiado. Si cuenta con recursos suficientes para adquirir una licencia, podría optar por adquirirla, no significando del todo que lo comercial sea lo suficientemente superior a lo no comercial, pero si representa algunos agregados y comodidades a la hora de implementar un SIG o, en su manera más básica, a la manipulación y tratamiento de información geográfica de fuente vectorial y/o ráster.

11. BIBLIOGRAFÍA

11.1. Referentes impresos consultados

- Altares Escobar, P. (1993). *Objetivos en planificación hidrológica*. En J. Andreu (ed.). *Conceptos y métodos para la planificación hidrológica* (pp. 41-47). España: CIMNE.
- Arctur D. & Zeiler M. (2004). *Designing Geodatabases. Case Studies in GIS Data Modeling*. California, USA: ESRI Press.
- Berry, J.K. (1995). *Spatial Reasoning For Effective GIS*.
- Burrough P.A. & McDonnell R.A. (1998). *Principals of Geographical Information Systems*. USA: Oxford Univertisy Press.
- Bernabé Poveda M. A & López Vázquez C. M. (2012). *Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE)*. España: UPM Press.
- Barnolas Viladés, M., Llasat Botija, M. d. C., & Centro de Estudios Hidrográficos. (2007). *Metodología para el estudio de inundaciones históricas en España e implementación de un SIG en las cuencas del ter, segre y llobregat*. Madrid: Cedex.
- Ceballos Barbancho A. (2016). *Aplicación de las herramientas básicas del módulo HYDROLOGY de ArcGIS 10.3*. Universidad de Salamanca.
- Confederación Hidrográfica del Duero (Valladolid, España). (2014). *El plan hidrológico de la cuenca del Duero: Documento resumen*. Valladolid: Confederación Hidrográfica del Duero.
- Confederación Hidrográfica del Duero (Valladolid, España). (2010). *Propuesta de proyecto de plan Hidrológico de cuenca: Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero*. Valladolid: S.N.
- Gutiérrez Puebla J. & Gould M. (2010). *SIG: Sistemas de Información Geográfica*. Madrid, España: SINTESIS.
- Huerta Hurtado P. (2016). *La cuenca de drenaje: soporte físico de los procesos hidrológicos*. Departamento de Geología, Escuela Politécnica Superior de Ávila. Universidad de Salamanca
- Maidment R. D. (ed.) (2002). *Arc Hydro GIS for Water Resourses*. California, USA: ESRI Press.
- Ministerio de Medio Ambiente de España [MMA] (1997). *Introducción al análisis de la planificación hidrológica (2ª ed.)*. Madrid, España: Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica.

- Ministerio de Medio Ambiente de España [MMA] (2000). *Tres casos de planificación hidrológica*. España: Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica.
- Mongil Manso J., SANZ RONDA F. J., SAIZ ROJO A. (2002). *Los ríos en el entorno urbano de Ávila: problemas actuales y soluciones ambientalmente adecuadas*. Universidad Católica de Ávila y universidad de Valladolid.
- Moreno Jiménez A., Cañada Torrecilla R., Cervera Cruaños B., Fernández García F., Gómez García N., Martínez Suarez P., Prieto Flores M. (2007). *Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS (2ª Ed.)*. España: RA-MA.
- Olaya, V. (2011). *Sistemas de Información Geográfica*. Igarss 2014.
- Ordoñez C., & Martínez R. (2003). *Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones prácticas con Idrisi32 al análisis de riesgos naturales y problemáticas medioambientales*. España: RA-MA.
- Peña Llopis, J. (2006). *Sistemas de Información Geográfica aplicados a la gestión del territorio*. España: Club Universitario.
- Sánchez González, A. (1993). *Objetivos en planificación hidrológica*. En J. Andreu (ed.). *Conceptos y métodos para la planificación hidrológica* (pp. 15-23). España: CIMNE.
- Sánchez Muñoz, M. J. (2002). *La cuenca alta del Adaja (Ávila): diagnóstico geográfico y bases para un desarrollo rural integrado*. Ávila, España: IMCODÁVILA, S.A.
- Shreve S. (1966). *R.L. Statistical law of stream numbers*. J. Geol, 74:17-37.
- Strahler A. N. (1964). *Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks*. In V.T. Chow, editor, *Handbook of Applied Hydrology*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Tarboton D.G., Bras R.L., & Rodriguez-Iturbe I. (1991). *On the extraction of cannel networks from digital elevation data*. *Hydrologic Processes*, 5(1):81-100.
- Tomlinson R. (2007). *Pensando en el SIG. Planificación del Sistema de Información Geográfica Dirigida a Gerentes (3ª ed.)*. USA: ESRI Press.

11.2. Referentes digitales consultados

- Aemet, I. (2011). Atlas climático ibérico/Iberian climate atlas. Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (p. 79). Recuperado de: http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/Atlas-climatologico/Atlas.pdf
- Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. Ministerio de la Presidencia. *Plan Hidrológico Nacional* (2001). Recuperado de: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2004-11438>
- Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. Ministerio de la Presidencia. *Real Decreto Legislativo (RDL) 1/2001, de 20 de julio*. (2001). Recuperado de: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2001-14276>
- Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. Ministerio de la Presidencia. *Real Decreto Legislativo (RDL) 907/2007, de 6 de julio*. (2007). Recuperado de: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-13182>
- Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. Ministerio de la Presidencia. *Real Decreto Legislativo (RDL) 125/2007, de 2 de febrero*. (2007). Recuperado de: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-2296>
- Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. Ministerio de la Presidencia. *Real Decreto Legislativo (RDL) 1/2016, de 8 de julio*. (2016). Recuperado de: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2016-439>
- Confederación Hidrográfica del Duero (CHD). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2015). *Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero*. Recuperado de: <http://www.chduero.es/Inicio/Planificaci%C3%B3n/Planhidrol%C3%B3gico20152021/PlanHidrol%C3%B3gico/tabid/734/Default.aspx>
- Confederación Hidrográfica del Duero (CHD). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2015). *Anejo 14. Atlas de Mapas*. Recuperado de: <http://www.chduero.es/Inicio/Planificaci%C3%B3n/Planhidrol%C3%B3gico20152021/PlanHidrol%C3%B3gicoVersi%C3%B3nConsejodelAgua/Anejo14AtlasdeMapas/tabid/704/Default.aspx>
- Diva GIS (2016). *Descarga de división político administrativa de España*. Recuperado de: <http://www.diva-gis.org/gData>
- ESRI España (2016). *Soluciones: Aguas*. Recuperado de: http://www.esri.es/es/soluciones/aguas_184/

García León J., García Martín A. & Torres Picazo M. (2013). *gvSIG: guía para el aprendizaje autónomo*. Repositorio Digital del Servicio de Documentación de la Universidad Politécnica de Cartagena, España. Recuperado de: <http://repositorio.upct.es/handle/10317/3262>

Instituto Geológico y Minero de España (2012). *Las aguas subterráneas en la planificación hidrogeológica*. Recuperado de: [http://www.magrama.gob.es/es/agua/publicaciones/AGUAS SUBTERRA NEAS 1de7 tcm7-213349.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/agua/publicaciones/AGUAS_SUBTERRA_NEAS_1de7_tcm7-213349.pdf)

Konecny P. (2007). *Cartografía: Herramienta para el desarrollo sostenible*. En dirección de R. Lorenzo Martínez & R. Rodríguez González. *Cartografía y desarrollo sostenible* (pp. 9-30). España: Federación Galega de Municipios e Provincias. Recuperado de: <http://www.tysmagazine.com/libro-gratuito-cartografia-herramienta-para-el-desarrollo-sostenible/>

Ministerio de Fomento. Instrucción de Carreteras (2016). *Norma 5.2-IC. Drenaje Superficial (Orden FOM/298/2016 de 15 de febrero)*. Recuperado de: http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/2482CE5B-4577-4E8D-81CF-C5E18DA53679/136083/ORDENFOM_298_2016.pdf

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2016). *Efectos del Cambio Climático en la Planificación Hidrológica*. Recuperado de: http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/sistema-espaniol-gestion-agua/110efectosdelcambioclimaticoenlaplanificacionhidrologica_tcm7-379815.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>

11.3. Páginas Web consultadas

Asamblea General de la Naciones Unidas (2016). *Desarrollo Sostenible*. Recuperado de: <http://www.un.org/es/ga/president/65/issues/sustdev.shtml>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (2016). *Atlas Climático*. Recuperado de: http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_climatico

Confederación Hidrográfica del Duero (CHD). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2015). *Características Generales de la Cuenca del Duero*. Recuperado de: <http://www.chduero.es/Inicio/LacuencadelDuero/Caracter%C3%ADsticas generales/tabid/86/Default.aspx>

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Ministerio de Economía y Competitividad de España (2016). *Bases de datos bibliográficas del CSIC*. Recuperado de: <http://bddoc.csic.es:8080/isoc.do>

Directiva Marco Europea del Agua (DMA). (2000). Recuperado de: <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/marco-del-agua/default.aspx>

Google Académico (2016). Recuperado de: <https://scholar.google.es/>

Infraestructuras de Datos Espaciales de España (IDEE). Ministerio de Fomento. (2016). *Servicios Web*. Recuperado de: <http://idee.es/web/guest/directorio-de-servicios>

Infraestructura de Datos Espaciales de Castilla y León (IDECYL). Junta de Castilla y León. (2016). *Servicios de descargas*. Recuperado de: <http://www.cartografia.jcyl.es/web/jcyl/Cartografia/es/Plantilla66y33/1284208420854//>

Instituto Nacional de Estadística (INE) (2016). *Cifras de población y censos demográficos*. Recuperado de: http://www.ine.es/inebaseDYN/cp30321/cp_inicio.htm

Instituto Geográfico Nacional (IGN) (2016). Ministerio de Fomento. *Centro Nacional de Información Geográfica. Centro de Descargas. Sistemas de Información Geográfica*. Recuperado de: <http://www.ign.es/ign/layoutIn/actividadesSistemaInfoGeografica.do>

Instituto Geográfico Nacional (IGN) (2015). *Centro Nacional de Información Geográfica. Centro de Descargas*. Recuperado de: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

Instituto Geológico y Minero de España (IGME) (2016). Ministerio de Economía y Competitividad (2016). *Cartografía Geocientífica*. Recuperado de: <http://www.igme.es/actividades/IGME/lineas/cartoGeo.htm>

Máster Universitario de Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Salamanca (2016). *Proyectos Fin de Máster*. Recuperado de: <http://campus.usal.es/~geotecnologias/index.htm>

Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) (2007). *Registro Estatal de Emisiones de Fuentes Contaminantes*. Recuperado de: <http://www.prtr-es.es/informes/gis.aspx>

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2016). *Sistema Español de Gestión del Agua*. Recuperado de: <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/sistema-espaniol-gestion-agua/>

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2016). *Libro Digital del Agua: Demanda y Uso del Agua*. Recuperado de: <http://servicios2.marm.es/sia/visualizacion/lda/socioeconomico/demanda.jsp>

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2015). *Reserva Hidráulica Española*. Recuperado de: <http://www.magrama.gob.es/es/prensa/noticias/la-reserva-hidr%C3%A1ulica-espa%C3%B1ola-se-encuentra-al-560-de-su-capacidad-total/tcm7-397561-16>

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2015). *Aguas Subterráneas*. Recuperado de: <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/aguas-subterraneas/>

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2016). *Descarga del Área de actividad del agua*. Recuperado de: <http://www.magrama.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/default.aspx>

Oliveros J. (4 de mayo de 2016). *Algo pasa con la nueva Norma 5.2-IC*. Recuperado de: <http://www.iagua.es/blogs/jordi-oliveras/algo-pasa-nueva-norma-52-ic>

Plan Hidrológico Nacional. (2001). Recuperado de: <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/plan-hidrologico-nacional/>

Ray Lesmar, “Caracterización en SIG de la subcuenca del Río Adaja como apoyo en procesos de Planificación Hidrológica” - Proyecto Fin de Máster 2015/2016

Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) (2016). *Presentación y Objetivo*. Recuperado de: <http://pnoa.ign.es/presentacion-y-objetivo>

Plataforma Springer Link Universidad de Salamanca (2016). *Catálogo*. Recuperado de: <https://bibliotecas.usal.es/inicio>

Real Academia Española (RAE) (2016). *Diccionario de la lengua española*. Recuperado de: <http://www.rae.es/>

Repositorio Documental GREDOS Universidad de Salamanca (2016). Recuperado de: <http://gredos.usal.es/jspui/advanced-search>

ScinceDirect (2016). *Explorador de artículos científicos*. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/search>

Sistema Integrado de Información del Agua (SIA) (2016). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Recuperado de: <http://servicios2.magrama.es/sia/visualizacion/descargas/documentos.jsp>

12. ANEXOS

- 12.1. ANEXO I: Base de Datos Geográfica en formato (. gdb)
- 12.2. ANEXO II: Ficheros ráster
- 12.3. ANEXO III: Mapas en formato PDF o JPEG para impresión física
- 12.4. ANEXO IV: Leyendas geológicas del proyecto MAGNA 50 del IGME